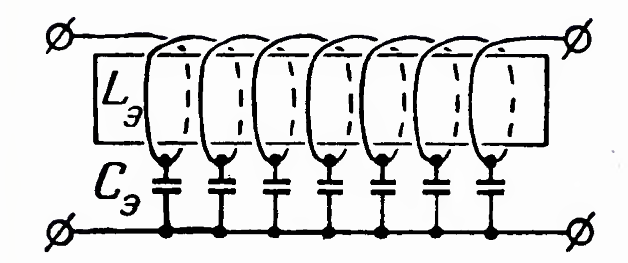
Библиотека по автоматике

А. А. Ильин

Разветвленные силовые сети как каналы связи для телемеханики



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

БИБЛИОТЕКА ПО АВТОМАТИКЕ

Выпуск 38

А. А. ИЛЬИН

РАЗВЕТВЛЕННЫЕ СИЛОВЫЕ СЕТИ КАК КАНАЛЫ СВЯЗИ ДЛЯ ТЕЛЕМЕХАНИКИ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА 1961 ЛЕНИНГРАД

ЭЭ-5(4)-3

Книга посвящена основным вопросам использования разветвленных силовых сетей как каналов связи для телемеханики.

В книге определяются электрические параметры всех основных элементов разветвленных силовых сетей — воздушных и кабельных, постоянного и переменного тока, освещаются вопросы рациональной высокочастотной обработки линий, выявляются причины образования резонансных явлений в сетях и даются методы настройки линий на оптимальный режим бегущей волны.

Описываются также наиболее приемлемые аналитические методы расчета высокочастотных каналов по силовым сетям, удобные для инженерных расчетов, и рассматривается вопрос моделирования.

Книга рассчитана на инженеров и техников, специализирующихся в области телемеханики, а также может быть полезна студентам старших курсов вузов.

6П2.15 *Ильин Анатолий Афанасьевич*
И 46 **Разветвленные силовые сети как каналы связи для телемеханики,** М. — Л., Госэнергоиздат, 1961.
104 с. с черт. (Б-ка по автоматике, вып. 38).

6П2. 15

* * *

Редактор *Б. Я. Жуховицкий* Техн. редактор *Г. Е. Ларионов*

Сдано в пр-во 30/III 1961 г.		Подписано к печати 27/V 1961 г.	
Формат бумаги $84\times108^1/_{32}$		5,33 п. л.	6 уч.-изд. л.
Т-05968	Тираж 18 000	Цена 30 коп.	Зак. 164

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее характерным направлением современного технического прогресса является переход к комплексной механизации и автоматизации.

Огромное количество предприятий таких отраслей народного хозяйства, как энергосистемы, железнодорожный транспорт, сельское хозяйство, шахты, нефтепромыслы, металлургические комбинаты и др., расположено на больших территориях. Для обеспечения координации работы отдельных объектов и механизмов этих предприятий большое значение приобретают централизованное (диспетчерское) управление и контроль. Вопросами контроля и управления на расстоянии занимается телемеханика: телеуправление, телерегулирование, телеизмерение и телесигнализация (ТУ, ТР, ТИ, ТС или, короче, ТУ—ТС).

Для нормальной работы телемеханической системы необходимо обеспечить передачи большого числа команд и сведений между диспетчерским пунктом (ДП) и исполнительными объектами (ИО). При этом важное значение приобретают вопросы наиболее надежных и вместе с тем экономичных способов передачи сигналов управления и контроля.

Решение поставленной проблемы может быть выполнено при использовании уже имеющихся на каждом предприятии распределительных электрических сетей (РЭС).

Распределительная силовая сеть 10/0,2 *кв* на любом предприятии охватывает, как правило, все основные объекты. Поэтому эти линии обычно имеют достаточные разветвленность и протяженность. Наиболее протяженные распределительные сети встречаются в сельском хозяйстве, на нефтепромыслах и т. п. Здесь расстояния между наиболее удаленными точками могут достигать десятков и даже сотен километров. Менее протяженные распреде-

лительные сети (длиной несколько километров) имеют горные предприятия, заводы и т. п.

Организация телемеханических систем с использованием в качестве каналов связи распределительных силовых сетей позволяет обойтись без строительства дополнительных дорогостоящих линейных сооружений и, таким образом, без больших затрат цветного металла и других дефицитных материалов. С экономической точки зрения целесообразно в первую очередь использовать распределительные сети большой протяженности, суммарная длина которых не менее 10 *км*.

В некоторых случаях, например при организации связи с движущимися объектами (электровозами, трамваями, экскаваторами и т. п.), целесообразно использование и менее протяженных линий. Особенно перспективна связь по распределительным силовым сетям в шахте, так как здесь использование радиоканалов или сигнальных кабелей чрезвычайно затруднено. Дальность передачи радиосигналов в шахте в зависимости от удельного сопротивления горных пород и длины волны получается от нескольких метров до нескольких сотен метров [Л. 28]. Наличие в шахте взрывоопасной и влажной среды и множества условий, которые могут вызвать механические повреждения, сильно затрудняет монтаж и эксплуатацию дорогостоящего и дефицитного кабельного хозяйства. К достоинствам воздушных и кабельных силовых линий следует отнести их более высокие механическую прочность и надежность.

В настоящее время имеются конкретные данные о технико-экономической эффективности, полученной в результате внедрения ряда телемеханических систем, которые работают по распределительным силовым сетям. Так, например, с внедрением шахтной диспетчерской высокочастотной связи использование подвижного состава увеличивается более чем на 30%. Годовая экономия только на одной шахте составляет 10—30 тыс. руб. Введение в шахте транспортной системы ТУ—ТС увеличивает экономию еще более чем в 2 раза.

Технико-экономические показатели не менее высоки при внедрении телемеханических систем в сельском хозяйстве и других отраслях народного хозяйства.

Задача применения различных распределительных электрических сетей 10/0,2 *кв* постоянного и переменного тока для целей высокочастотной диспетчерской связи и телемеханики в основном решена. Наиболее широко эти

сети используются в сельском хозяйстве и на шахтах; ведутся разработки по использованию распределительных сетей на нефтепромыслах, торфоразработках, в коммунальном хозяйстве и т. п. Практически передача сигналов управления и контроля возможна по любым распределительным электрическим сетям, воздушным и кабельным, после их специальной обработки [Л. 3, 4, 6, 10, 11, 13, 19, 20, 24 и 25].

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ПРИНЦИПЫ ОБРАЗОВАНИЯ ТЕЛЕМЕХАНИЧЕСКИХ КАНАЛОВ СВЯЗИ ПО СИЛОВЫМ ЦЕПЯМ

1. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРА ЧАСТОТ И МЕТОДЫ ОБРАЗОВАНИЯ КАНАЛОВ СВЯЗИ

Передача телемеханических сигналов аналогична телефонированию и телеграфированию. Как и сигналы связи, сигналы телемеханики передаются по проводным воздушным и кабельным линиям связи, по линиям электропередачи, по радиоканалам.

К настоящему времени все большее применение находят каналы телемеханики, высокочастотной связи и защиты, организованные по линиям электропередачи 0,1—400 *кв*. В этом случае телемеханические сигналы передаются переменным током, и каналы телемеханики называются частотными.

Наиболее значительной особенностью частотного телемеханического канала по сравнению с телефонным каналом связи является относительно малая занимаемая им полоса частот. Практически в зависимости от требуемого быстродействия, типа фильтров, необходимой помехоустойчивости и пр. телемеханические каналы связи занимают полосу частот от нескольких до сотен герц. При передаче сигналов по проводным линиям связи диапазон рабочих частот начинается с нулевой частоты (постоянный ток) и делится на: подтональный — 0—300 *гц*, тональный — 300—3 000 *гц*, надтональный — 3—6 *кгц* и диапазон высоких частот — свыше 6 *кгц*.

По линиям электропередачи телемеханические каналы организуются в диапазоне частот 30—300 *кгц*. Возможно использование и более высоких частот — до 1 000 *кгц*, но на коротких линиях, так как на высоких частотах происходит значительное увеличение затухания передаваемых сигналов. Более низкие частоты (<30 *кгц*) не применяют-

ся из-за высокого уровня электрических помех. Со снижением частоты интенсивность помех на линиях электропередачи возрастает.

Весь рабочий диапазон частот при помощи специальных устройств делится на ряд телемеханических каналов связи. В простейшем случае телеуправления и телесигнализации (ТУ—ТС) сигналами являются непосредственно токи высокой частоты. Выделение каждого канала на его концах осуществляется при помощи электрических фильтров [Л. 2 и 15].

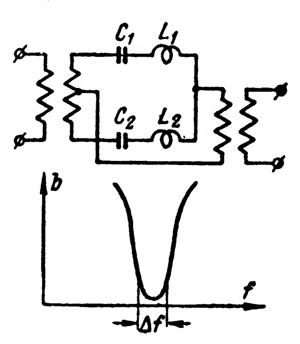


Рис. 1. Звено дифференциально-мостового фильтра и его частотная характеристика.

Электрический фильтр свободно пропускает токи определенной полосы частот (создает малое затухание) и задерживает токи с частотами, находящимися вне этой полосы (создает большое затухание). Для организации большого числа каналов по одной линии необходимо иметь фильтры с узкой полосой пропускания. Однако сужение полосы пропускания приводит к усложнению схемы фильтра.

Узкополосные фильтры собираются преимущественно по дифференциально-мостовой схеме (рис. 1). В тех случаях, когда необходимы очень стабильные частотные характеристики, применяют фильтры с кварцевыми элементами.

Чаще всего применяются системы ТУ—ТС с передачей по линии телемеханических сигналов в виде преобразованных токов высокой частоты. В таких телемеханических системах, как и при высокочастотном телефонировании, высокая частота (несущая) модулируется звуковыми частотами (поднесущими). В результате по каждому высокочастотному каналу передается сигнал, занимающий весь тональный диапазон частот, в котором может быть организовано до 20 телемеханических каналов.

При расфильтровке звуковых частот требуются по сравнению с высокими частотами относительно более простые схемы фильтров, что и позволяет весь тональный спектр поделить на узкие полосы частот шириной порядка 100—200 *гц*. Так, например, в аппаратуре ТМТ-6м тональный диапазон частот делится на 16 каналов, ширина каждого из которых равна 180 *гц*.

В настоящее время получают широкое распростране-

ние частотные избиратели в виде простого последовательного резонансного контура с катушкой индуктивности, намотанной на альсиферовом или оксиферовом сердечнике, что обеспечивает сравнительно высокую добротность на низких частотах. Катушка индуктивности выполняется в виде автотрансформатора, в понижающую обмотку которого включается исполнительное реле. Каждый из контуров настроен на частоту одного из каналов. Поэтому при поступлении сигнала данной частоты срабатывает то реле, контур которого настроен на эту частоту.

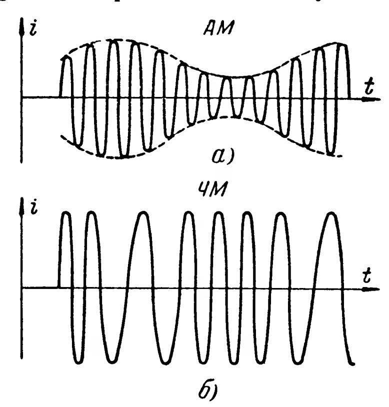


Рис. 2. Графики модулированного тока.

а — при АМ — амплитудной модуляции; *б* — при ЧМ — частотной модуляции.

В тональном диапазоне частот 300—3 000 *гц* при использовании индуктивностей с тороидальными сердечниками типа ТЧ-60 размещается 15—20 резонансных частот.

Модуляция тока высокой частоты на передающем конце канала и демодуляция на его приемном конце могут быть осуществлены по амплитуде, частоте или фазе (АМ, ЧМ, ФМ). Практически применяются почти исключительно первые два способа модуляции (рис. 2).

При амплитудной модуляции (рис. 2,*а*) изменяется амплитуда тока высокой частоты (модулируемой) в соответствии с изменением тока низкой частоты (модулирующей). При частотной модуляции (рис. 2,*б*) амплитуда тока высокой частоты постоянна, а изменяется частота в соответствии с изменением амплитуды сигнала низкой частоты.

После модуляции сигнал состоит из тока несущей частоты и токов так называемых боковых частот. Так, при наличии чисто синусоидального модулирующего тока с частотой f после амплитудной модуляции, помимо несущей частоты — F, образуются токи верхней боковой частоты $F+f$ и нижней $F-f$. В общем случае вместо боковой частоты может быть полоса или несколько полос.

По линии возможна передача токов обеих боковых полос. Тогда линейные (групповые) фильтры *ЛФ* имеют

относительно простую схему, но канал занимает довольно широкую полосу частот $(F+f)-(F-f)=2f$, что значительно сокращает возможное число каналов. В большинстве же случаев осуществляется передача только одной верхней или нижней боковой полосы частот (без передачи несущей частоты). При этом занимается вдвое меньшая полоса частот ($\sim f$), а схемы линейных фильтров несколько усложняются.

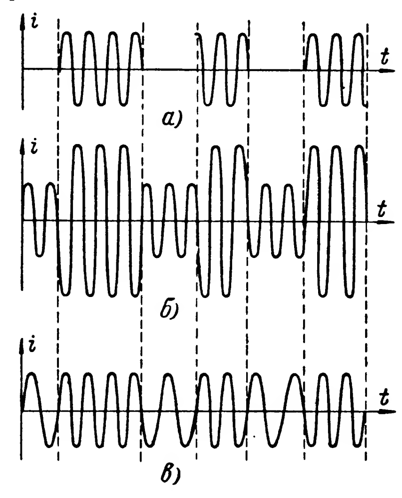


Рис. 3. Графики тока.
а, б — при амплитудной манипуляции; *в* — частотная манипуляция.

Устанавливаемый на приемном конце канала демодулятор преобразует поступающие из линии сигналы в такой вид, который они имели на входе модуляторов. В качестве модуляторов и демодуляторов применяются те или иные схемы с нелинейными элементами, электронными лампами, полупроводниковыми диодами и триодами и т. п.

При амплитудной манипуляции во время паузы ток в линии должен резко уменьшаться или полностью прекратиться (рис. 3,*а* и *б*). При частотной манипуляции переход от импульса к паузе сопровождается изменением частоты тока в линии (рис. 3,*в*). Манипуляции осуществляются при помощи электромагнитных или бесконтактных реле.

2. ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ КАНАЛОВ ПО РАЗВЕТВЛЕННЫМ СИЛОВЫМ СЕТЯМ

По сравнению с проводными линиями связи разветвленные силовые сети (РСС) имеют ряд особенностей, которые определяются прежде всего конструкцией линии и наличием в ней тока с частотой 50 *гц*. Структурная схема высокочастотного канала по распределительной силовой сети показана на рис. 4.

Присоединение аппаратуры ТУ—ТС к линиям электропередачи производится через специальные устройства присоединения, которые необходимы для безопасной работы аппаратуры и обслуживающего персонала. Главным эле-

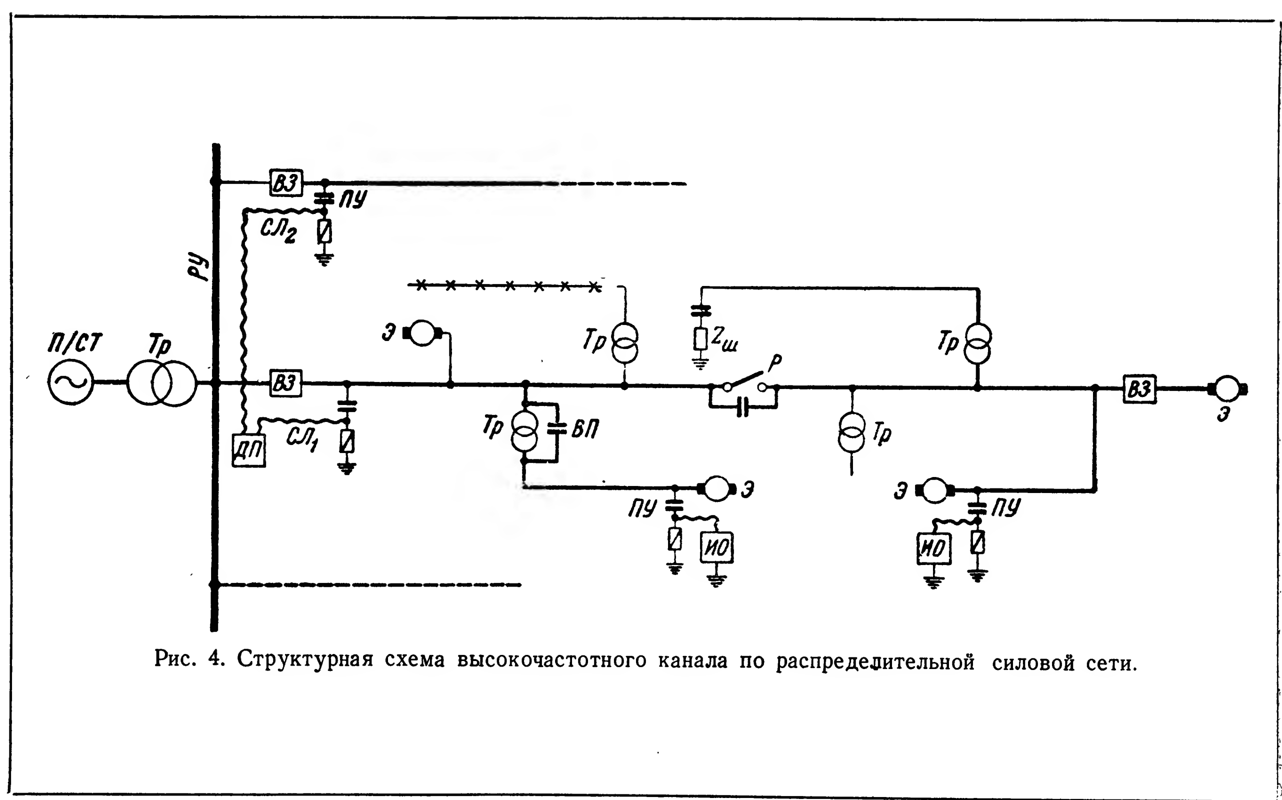


Рис. 4. Структурная схема высокочастотного канала по распределительной силовой сети.

ментом устройства присоединения является конденсатор связи, который свободно пропускает токи высокой частоты и практически совершенно не пропускает ток с частотой 50 *гц*.

Разветвленные силовые сети предназначены в основном для распределения электроэнергии между главными объектами предприятия. Сооружаются они без учета требований, предъявляемых к каналам связи. К распределительным электрическим сетям 10/0,2 *кв* подключается различное силовое электрооборудование (силовые трансформаторы *Тр*, генераторы, электродвигатели *Э*, масляные выключатели, электроподстанции, высоковольтные кабели и др.). Все это неблагоприятно влияет на передачу телемеханических сигналов, вызывает их дополнительное затухание.

Наиболее значительно влияют подключения, имеющие малое входное сопротивление. К таким относятся, например, мощные электродвигатели, кабели, статические конденсаторы.

Распределительные электрические сети чрезвычайно разнообразны по своим структурным схемам, имеют, как правило, значительное количество ответвлений, причем длина некоторых из них может быть соизмеримой с длиной волны или ее частью. Концы ответвлений и линии во многих случаях разомкнуты.

Разомкнутые ответвления, длина которых соизмерима с $^1/_4\lambda$, $^3/_4\lambda$ и т. д., имеют очень малое входное сопротивление, поэтому в месте их подключения для токов высокой частоты практически образуется короткое замыкание. При необходимости включения подобного ответвления в схему канала связи на конце ответвления необходимо иметь нагрузку, сопротивление которой $Z_н$ равно волновому сопротивлению линии. Тогда и входное сопротивление ответвления возрастает до величины, равной волновому сопротивлению линии. Если на ответвлении отсутствуют объекты ТУ—ТС, то в месте его присоединения к линии необходимо устанавливать высокочастотный заградитель (ВЗ).

Для образования единой схемы связи в некоторых точках сети устанавливают высокочастотные перемычки (ВП). Высокочастотные перемычки необходимы на секционных разъединителях (Р), установленных, например, в контактных сетях электровозной откатки, при питании каждого изолированного участка линии от своей тяговой подстанции. Высокочастотные перемычки могут устанав-

ливаться на промежуточных силовых трансформаторах (Тр), вносящих значительное затухание для токов высокой частоты, в обход промежуточных электроподстанций и т. п.

К оборудованию высокочастотных каналов относятся и устройства, предназначенные для уменьшения уровня электрических помех, которые выполняются в виде специальных помехозащитных фильтров.

3. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ РАЗВЕТВЛЕННЫХ СИЛОВЫХ ЦЕПЕЙ

Для организации каналов связи наиболее перспективными являются распределительные силовые сети таких промышленных предприятий, как шахты, нефте- и газопромыслы, железнодорожный и городской транспорт, сельское и коммунальное хозяйство, крупные металлургические комбинаты, строительные площадки и др.

По роду тока эти сети делятся на линии переменного и постоянного тока. К линиям постоянного тока относятся контактные сети электровозного, железнодорожного, городского и подземного транспорта.

Контактная сеть железнодорожного транспорта имеет линии очень большой протяженности при малом количестве ответвлений различной конфигурации на станционных участках. Подключение тяговых подстанций осуществляется, как правило, воздушными питающими фидерами.

Городской электротранспорт имеет значительно менее протяженные, но более разветвленные контактные сети. Длина линий может быть от нескольких километров до нескольких десятков километров. Аналогичную контактную сеть по конфигурации и протяженности имеют угольные шахты. У рудных шахт контактная сеть короче и более разветвлена. Длина линии на этих шахтах обычно не превышает 1—2 *км*. Присоединение тяговых подстанций к контактной сети городского и подземного транспорта выполняется при помощи кабелей. Количество электровозов, работающих на линии, зависит от размеров шахты. Помимо некоторых конструктивных особенностей, эти контактные сети различаются по напряжению (3 300—600—260 *в*).

Контактные сети при соответствующей высокочастотной обработке успешно могут быть использованы для диспетчерской высокочастотной связи с электропоездами и для транспортной системы телеуправления и телесигнализации. В настоящее время имеется ряд подобных систем на под-

земном и городском электротранспорте. Аналогичным образом могут быть использованы и контактные сети открытых разработок, металлургических заводов, портов и стройплощадок.

Наиболее многочисленной и разнообразной является группа распределительных сетей переменного тока напряжением 10/0,2 *кв*. Эти линии могут быть воздушными, кабельными и комбинированными. Многопроводная конструкция таких линий позволяет осуществить несколько вариантов схемы подключения высокочастотной аппаратуры (рис. 5): а) «фаза—земля»; б) «фаза—фаза»; в) «три фазы—земля»; г) «две фазы—фаза».

Выбор той или иной схемы определяется требованием получить минимальное затухание сигналов при максимальной простоте устройства присоединения. Чаще применяется схема «фаза—земля» с самыми малыми затратами на высокочастотную обработку (обрабатывается только одна фаза линии).

Как и высоковольтные линии электропередачи, разветвленные силовые сети напряжением 10/0,2 *кв* успешно могут быть использованы для высокочастотной связи и организации каналов телемеханики. В последние годы появился ряд работ [Л. 10—13, 25 и 27], подтверждающих принципиальную возможность передачи телемеханических сигналов на требуемое расстояние по распределительным силовым сетям при соответствующей высокочастотной обработке. Было установлено, что при небольшом количестве подключений к распределительной силовой сети затухание сигналов в линии невелико и дальность передачи телемеханических сигналов достигает десятков и даже сотен километров. При увеличении числа подключений дальность передачи резко сокращается. Так, например, радиус передачи по контактным сетям рудных шахт составляет всего несколько километров. В таких линиях величина сигнала быстро уменьшается из-за километрического затухания, а также большой утечки тока высокой частоты через различные подключения (ответвления, электродвигатели и т. п.) распределительной силовой сети.

При небольшом количестве подключений затухание сигналов зависит в основном от электрических параметров линии, которые определяются ее конструкцией (количеством проводов, их подвеской, материалом и пр.). Для некоторого уменьшения потерь, создаваемых различными подключениями распределительной силовой сети, необхо-

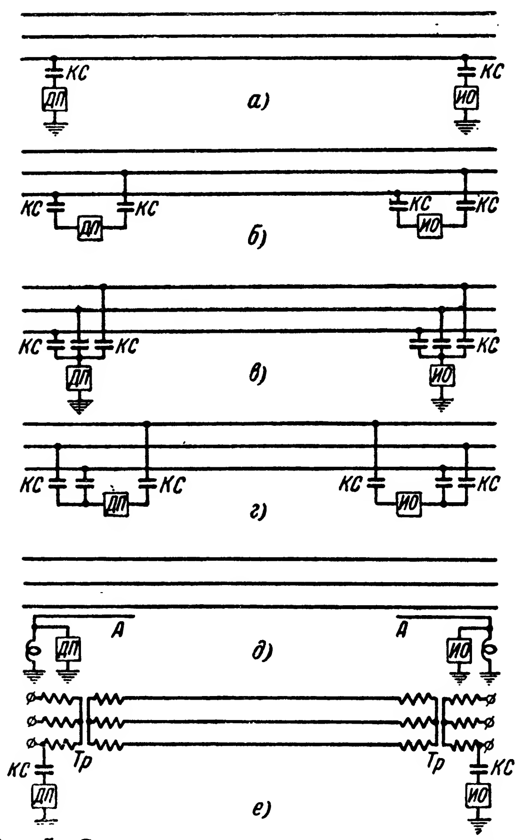


Рис. 5. Способы присоединения высокочастотной аппаратуры к линии электропередачи.

а, б, в г — через конденсаторы связи *КС* по схемам „фаза — земля", „фаза — фаза" „три фазы — земля" и „две фазы — фаза"; *д* — антенный способ; *е* — через конденсатор связи и силовой трансформатор,

дима, как уже отмечалось, их высокочастотная обработка.

Для анализа условий распространения токов высокой частоты по различным разветвленным силовым сетям приведем некоторые сведения из теории электросвязи.

4. НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОСВЯЗИ

Если линия состоит из проводов одинакового сечения и материала, расположенных на равном расстоянии друг от друга, и не имеет вдоль своей длины каких-либо нагру-

зок, то ее называют однородной. При подключении к началу линии источника синусоидальной э. д. с. (источника питания, генератора) по линии распространяется электромагнитная волна, которую называют бегущей.

Соотношение между напряжением U и током I бегущей электромагнитной волны определяется выражением

$$Z_c = \frac{\dot{U}}{\dot{I}}. \tag{1}$$

Величина Z_c имеет размерность сопротивления (*ом*) и называется волновым сопротивлением линии. Это — сопротивление, которое распространяющаяся по однородной линии электромагнитная волна встречает во всех точках линии. У однородной линии волновое сопротивление Z_c постоянно и не зависит от ее длины.

Для обеспечения устойчивой и надежной работы каналов связи сопротивление нагрузки в конце линии $Z_н$ должно равняться волновому сопротивлению. Поступившая к концу линии бегущая волна полностью поглощается сопротивлением $Z_н$ (согласованное сопротивление), и при этом сразу наступает установившийся режим в линии. При согласованной нагрузке и входное сопротивление в любой точке линии равно волновому сопротивлению.

При наличии в линии только бегущей волны (линия замкнута на согласованное сопротивление) соотношение между напряжением U_x в любой точке линии на расстоянии x от начала и напряжением в конце линии $U_к$

$$\frac{\dot{U}_x}{\dot{U}_к} = e^{\gamma(l-x)}. \tag{2}$$

Аналогична связь между токами:

$$\frac{\dot{I}_x}{\dot{I}_к} = e^{\gamma(l-x)}. \tag{3}$$

При $x=0$, т. е. в начале линии,

$$\frac{\dot{U}_н}{\dot{U}_к} = e^{\gamma l}; \quad \frac{\dot{I}_н}{\dot{I}_к} = e^{\gamma l}. \tag{4}$$

Здесь γ — постоянная распространения;
$e = 2,71\ldots$ — основание натуральных логарифмов;

l — длина линии;

$$\dot{U}_н = U_н e^{j\psi_н}; \quad \dot{U}_к = U_к e^{j\psi_к};$$
$$\dot{I}_н = I_н e^{j\varphi_н}; \quad \dot{I}_к = I_к e^{j\varphi_к}$$

— комплексы напряжений и токов;
$U_н$, $U_к$, $I_н$, $I_к$ — модули напряжений и токов;
$\psi_н$, $\psi_к$, $\varphi_н$, $\varphi_к$ — фазы напряжений и токов.

Постоянная распространения — величина комплексная:

$$\gamma = \beta + j\alpha. \qquad (5)$$

Оба члена этого выражения принято определять на 1 *км* длины линии. Величину β называют километрическим затуханием, а величину α — коэффициентом фазы.

Таким образом,

$$\frac{\dot{I}_н}{\dot{I}_к} = \frac{\dot{U}_н}{\dot{U}_к} = e^{\beta l} e^{j\alpha l}. \qquad (6)$$

Здесь сомножитель $e^{\beta l}$ показывает, на какую величину модуль напряжения $U_к$ или тока $I_к$ в конце линии меньше модуля напряжения $U_н$ или тока $I_н$ в начале линии при согласованной нагрузке. Сомножитель $e^{j\alpha l}$ характеризует величину сдвига фазы между напряжениями или токами в начале и конце линии при согласованной нагрузке:

$$\alpha l = \psi_н - \psi_к = \varphi_н - \varphi_к. \qquad (7)$$

Из выражения (6) следует:

$$\beta l = \ln \frac{I_н}{I_к}; \quad \beta l = \ln \frac{U_н}{U_к};$$
$$\beta l = \frac{1}{2} \ln \frac{P_н}{P_к}. \qquad (8)$$

Здесь $I_н$, $U_н$ и $P_н = U_н I_н$ — ток, напряжение и полная мощность в начале линии;
$I_к$, $U_к$ и $P_к$ — ток, напряжение и полная мощность в конце линии.

Величина βl характеризует потери в линии и измеряется в неперах (*неп*).

Затухание линии в 1 *неп* означает, что амплитуды напряжения и тока вдоль линии уменьшаются в 2,7 раза, а полная мощность — в 7,4 раза.

Наряду с неперами для измерения затухания пользуются децибелами (*дб*). Тогда затухание линии

$$\beta l = 10 \lg \frac{P_н}{P_к} = 20 \lg \frac{U_н}{U_к} = 20 \lg \frac{I_н}{I_к}.$$

Переход от неперов к децибелам и обратно выполняется при помощи следующих соотношений:

$$1\ дб = 0{,}115\ неп; \quad 1\ неп = 8{,}68\ дб.$$

Величины $Z_с$ и γ называются вторичными параметрами линии.

Первичными параметрами линии являются: активное сопротивление R, индуктивность L, емкость C и проводимость утечки G. Первичные параметры также определяются на 1 *км* длины линии.

Вторичные параметры определяются через первичные по формулам:

$$Z_с = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}; \tag{9}$$

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}. \tag{10}$$

Коэффициент фазы может быть представлен через скорость распространения электромагнитной волны v:

$$\alpha = \frac{\omega}{v}\ рад/км. \tag{11}$$

Для некоторых линий можно принять, что $R \ll \omega L$, а $G \ll \omega C$, т. е. $\gamma = j\omega\sqrt{LC} = j\alpha$. Такие линии называются линиями без потерь. Тогда

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \tag{12}$$

Скорость распространения волны v по медным воздушным линиям приблизительно равна скорости распространения света в вакууме $c = 3 \cdot 10^5$ *км/сек*. На стальных цепях v несколько меньше; еще меньше скорость распространения на кабельных линиях. Здесь $v \approx \frac{1}{2} c$.

Через скорость распространения определяется длина бегущей волны:

$$\lambda = \frac{v}{f}, \tag{13}$$

где f — частота тока.

Во многих случаях сопротивление нагрузки в конце линии не равно волновому сопротивлению линии ($Z_н \neq Z_с$). Тогда бегущая волна только частично поглощается в конце линии; другая ее часть, отразившись, возвращается к началу линии. Электромагнитную волну, движущуюся от источника питания к концу линии, называют падающей, а электромагнитную волну, возникающую вследствие отражения от конца линии,— отраженной. Отраженная волна при распространении по линии, так же как и падающая волна, встречает в каждой точке сопротивление, равное волновому сопротивлению линии $Z_с$.

В зависимости от сопротивления нагрузки линии соотношение между величинами напряжения или тока падающих и отраженных волн определяется в виде:

$$\frac{\dot{I}_о}{\dot{I}_п} = -p; \quad \frac{\dot{U}_о}{\dot{U}_п} = p; \tag{14}$$

$$p = \frac{Z_н - Z_с}{Z_н + Z_с}, \tag{15}$$

где p — коэффициент отражения;

$I_о$, $U_о$ — ток и напряжение отраженной волны;

$I_п$, $U_п$ — ток и напряжение падающей волны.

Как видно из выражения (15), в зависимости от величины $Z_н$ коэффициент отражения изменяется в пределах от -1 до $+1$, переходя при $Z_н = Z_с$ через нуль.

Если $p = -1$, это означает, что $Z_н = 0$, т. е. линия на конце короткозамкнута; при этом $\dot{I}_о = \dot{I}_п$, а $\dot{U}_о = -\dot{U}_п$. Поэтому результирующий ток на конце короткозамкнутой линии в результате сложения амплитуд токов $I_о$ и $I_п$ имеет максимальное значение, равное удвоенной величине амплитуды тока одной волны, в то время как результирующее напряжение равно нулю (рис. 6).

Если $p = 1$, то $\dot{I}_о = -\dot{I}_п$, а $\dot{U}_о = \dot{U}_п$, что означает работу линии с разомкнутым концом (холостой ход, $Z_н = \infty$). Ток на конце разомкнутой линии равен нулю, напряжение удваивается.

Отраженная волна может возникнуть не только в конце линии, но и в любой ее точке, где нарушается однородность линии. Неоднородность создают ответвления, различное электрооборудование, включенное не в конце линии, и т. п. Отра-

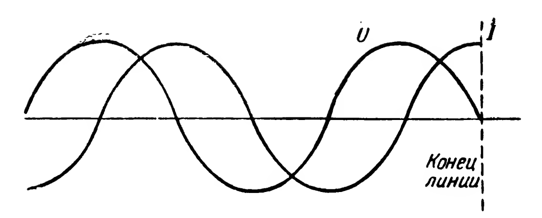


Рис. 6. Распределение тока и напряжения в линии без потерь при короткозамкнутом конце линии.

жение происходит также на стыках кабельной и воздушной линии в случае кабельной вставки в воздушной линии или, наоборот, при наличии участка воздушной линии в кабельной.

Входное сопротивление при коротком замыкании линии $Z_к$ и холостом ходе линии $Z_х$ определяется по формулам:

$$Z_к = Z_с \operatorname{th} \gamma l; \tag{16}$$

$$Z_х = Z_с \operatorname{cth} \gamma l. \tag{17}$$

По известным значениям $Z_к$ и $Z_х$ нетрудно определить величину волнового сопротивления:

$$Z_с = \sqrt{Z_к Z_х}. \tag{18}$$

Входное сопротивление линии, имеющей произвольную нагрузку $Z_н \neq Z_с$, определяется по формуле

$$Z_{вх} = Z_н \frac{\operatorname{ch} \gamma l + \frac{Z_с}{Z_н} \operatorname{sh} \gamma l}{\operatorname{ch} \gamma l + \frac{Z_н}{Z_с} \operatorname{sh} \gamma l}. \tag{19}$$

Когда линия нагружена на произвольную нагрузку, затухание сигналов в ней определяется не просто затуханием линии βl, а так называемым рабочим затуханием $b_р$, которое рассчитывается по формуле

$$b_р = \beta l + \ln \left| \frac{Z_{н1} + Z_с}{2\sqrt{Z_{н1} Z_с}} \right| + \ln \left| \frac{Z_{н2} + Z_с}{2\sqrt{Z_{н2} Z_с}} \right| + \\ + \ln \left| 1 - \frac{Z_{н1} - Z_с}{Z_{н1} + Z_с} \cdot \frac{Z_{н2} - Z_с}{Z_{н2} + Z_с} e^{-2\gamma l} \right|. \tag{20}$$

Как видно из выражения (20), рабочее затухание зависит от километрического затухания, длины линии, волнового сопротивления, сопротивления нагрузки линии $Z_{н2}$ и внутреннего сопротивления генератора $Z_{н1}$. Величина $b_р$ состоит из четырех слагаемых:

первое — собственное затухание линии;

второе — затухание вследствие несогласованности внутреннего сопротивления генератора и волнового сопротивления линии;

третье — затухание вследствие несогласованности волнового сопротивления и сопротивления нагрузки линии;

четвертое — затухание вследствие многократных отражений.

При согласовании линии на одном из ее концов обращаются в нуль четвертый и второй или третий члены, в зависимости от того, на каком конце линия согласована. Например, если $Z_{н1}=Z_с$, то

$$b_р=\beta l+\ln\left|\frac{Z_{н2}+Z_с}{2\sqrt{Z_{н2}Z_с}}\right|; \qquad (21)$$

при $Z_{н1}=Z_{н2}=Z_с$ имеем $b_р=\beta l$. (22)

Линия, имеющая затухание βl больше 1,5 *неп*, называется часто «длинной» линией. В такой линии вследствие большого затухания сигналов можно не учитывать многократности отражений.

В реальных условиях однородные линии связи встречаются редко. Практически система передачи сигналов в большинстве случаев имеет несколько участков линии. Для удобства анализа и расчета таких сложных линий часто участки линии, имеющие распределенные параметры, приводят к сосредоточенным эквивалентным им элементам — четырехполюсникам (рис. 7). Под четырехполюсником понимают любую электрическую систему, имеющую четыре полюса (зажима), два из которых — входные (*1—1'*) и два — выходные (*2—2'*).

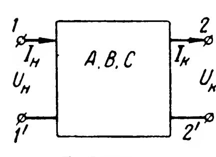


Рис. 7. Эквивалентная схема участка линии.

Четырехполюсник, состоящий из сосредоточенных элементов (сопротивлений, катушек и конденсаторов), соединенных по определенной схеме, может достаточно точно отображать свойства участка линии, имеющей распреде-

ленные параметры. Соответствие будет тем точнее, чем меньше длина замещаемого участка линии. В итоге любая линия может быть представлена в виде соединения четырехполюсников, замещающих не только участки самой линии, но и любые подключения (трансформаторы, ответвления, посты связи и пр.).

Четырехполюсники, замещающие однородные участки линии, — симметричные. Их основные уравнения передачи, устанавливающие зависимости токов и напряжений на входе и выходе, совершенно аналогичны соответствующим уравнениям участка линии длиной l:

$$\dot{U}_{н} = \dot{U}_{к} \operatorname{ch} \gamma l + \dot{I}_{к} Z_{с} \operatorname{sh} \gamma l = A\dot{U}_{к} + B\dot{I}_{к} = \\ = \dot{U}_{к} \operatorname{ch} g + \dot{I}_{к} Z_{с} \operatorname{sh} g; \tag{23}$$

$$\dot{I}_{н} = \frac{\dot{U}_{к}}{Z_{с}} \operatorname{sh} \gamma l + \dot{I}_{к} \operatorname{ch} \gamma l = \\ = C\dot{U}_{к} + A\dot{I}_{к} = \frac{\dot{U}_{к} \operatorname{sh} g}{Z_{с}} + \dot{I}_{к} \operatorname{ch} g, \tag{24}$$

где

$$A = \operatorname{ch} g = \operatorname{ch} \gamma l; \quad B = Z_{с} \operatorname{sh} g = Z_{с} \operatorname{sh} \gamma l;$$

$$C = \frac{\operatorname{sh} g}{Z_{с}} = \frac{\operatorname{sh} \gamma l}{Z_{с}}$$

— коэффициенты, определяющие электрические свойства четырехполюсника.

Коэффициент A безразмерный, B имеет размерность сопротивления, а C — проводимости. Их величины определяются схемой четырехполюсника, т. е. параметрами $Z_{с}$, γ и l замещаемой линии или параметрами какого-либо иного объекта. Они связаны между собой зависимостью

$$A^2 - BC = 1. \tag{25}$$

Симметричные четырехполюсники определяются не только коэффициентами A, B, C, но, так же, как и длинные линии, характеристическим сопротивлением $Z_{с}$, соответствующим волновому сопротивлению участка линии, и постоянной передачи $g = \gamma l$, которые выражаются через коэффициенты A, B, C следующим образом:

$$Z_{с} = \sqrt{\frac{B}{C}}; \quad g = \ln (A + \sqrt{BC}). \tag{26}$$

Для практических целей параметры Z_c и g четырехполюсников удобно определять в зависимости от входных сопротивлений при холостом ходе и коротком замыкании:

$$Z_c = \sqrt{Z_x Z_к}; \quad \operatorname{th} g = \sqrt{\frac{Z_к}{Z_x}}.$$

ГЛАВА ВТОРАЯ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ РАЗВЕТВЛЕННЫХ СИЛОВЫХ ЦЕПЕЙ

5. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Для определения условий передачи электромагнитных волн по любой разветвленной силовой сети необходимо знать первичные и вторичные параметры линии, входные сопротивления электродвигателей, трансформаторов и прочих ее подключений. Первичные параметры определяются конструкцией линии и зависят от материала, количества и сечения проводников линии, их взаимного расположения и расположения относительно земли. Вторичные параметры характеризуют условия передачи сигналов и могут быть выражены через первичные параметры линии.

В данной главе приведены расчетные формулы электрических параметров некоторых основных типов разветвленных силовых сетей и показаны зависимости их величин от конструктивных особенностей рассматриваемых линий. Помимо электрических параметров линии, на условия передачи телемеханических сигналов влияют различные подключения линии (электродвигатели, трансформаторы и т. п.). Поэтому приводятся данные о величинах входных сопротивлений этих подключений в зависимости от их типа, назначения, мощности и пр.

6. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВОЗДУШНЫХ СИЛОВЫХ ЦЕПЕЙ

Наиболее общая схема подвески проводов воздушных трехфазных силовых сетей показана на рис. 8. Для расчета электрических параметров линии реальную трехфазную линию приводят к эквивалентной симметричной линии, имеющей следующие конструктивные размеры:

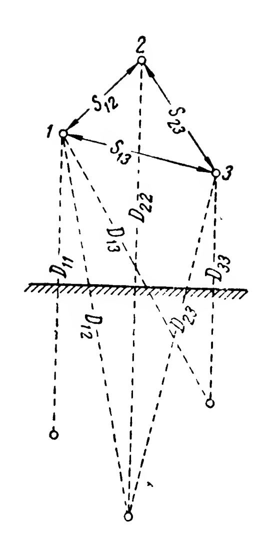


Рис. 8. Расположение проводов воздушной трехфазной линии.

среднее расстояние между проводами

$$S=\sqrt[3]{S_{12}S_{13}S_{23}}; \tag{27}$$

среднее расстояние между проводом и его зеркальным изображением

$$D_0=\sqrt[3]{D_{11}D_{22}D_{33}}; \tag{28}$$

среднее расстояние между проводом и зеркальным изображением другого провода

$$D=\sqrt[3]{D_{12}D_{13}D_{23}}. \tag{29}$$

Приведем выражения для первичных параметров трехфазной линии:

1. Активное сопротивление линии зависит от материала и сечения проводов, их расположения относительно друг друга, а также от частоты протекающего тока.

Активное сопротивление петли провод — земля

$$R=R_f+R_з \ \ ом/км, \tag{30}$$

где R_f — сопротивление провода для токов высокой частоты;
$R_з$ — сопротивление, обусловленное потерями в земле.

Для медных или сталеалюминиевых проводов

$$R_f=0{,}56\sqrt{fr_0} \ \ ом/км, \tag{31}$$

где f — частота, *кгц*;
r_0 — сопротивление провода постоянному току, *ом/км*.

Для стальных проводов:

$$R_f=kr_0 \ \ ом/км. \tag{32}$$

Коэффициент k определяется по табл. 1 в зависимости от

$$x=5\sqrt{\frac{f\mu}{r_0 10}}. \tag{33}$$

Здесь f — частота, *кгц*;
μ — магнитная проницаемость материала провода.

Сопротивление $R_з$ определяется по формуле

$$R_з=2{,}54fp. \tag{34}$$

Таблица 1

x	k	x	k	x	k	x	k	x	k
1	1,0	3,7	1,566	9,6	3,658	38	13,688	72	25,708
0,1	1,0	3,8	1,603	9,8	3,728	39	14,041	73	26,059
0,2	1,00001	3,9	1,64	10,0	3,799	40	14,395	74	26,413
0,3	1,00004	4,0	1,678	10,5	3,975	41	14,748	75	26,766
0,4	1,00013	4,1	1,715	11,0	4,151	42	15,102	76	27,119
0,5	1,00032	4,2	1,756	11,5	4,327	43	15,455	77	27,472
0,6	1,00067	4,3	1,789	12,0	4,504	44	15,809	78	27,825
0,7	1,00124	4,4	1,826	12,5	4,68	45	16,162	79	28,182
0,8	1,00212	4,5	1,863	13,0	4,856	46	16,516	80	28,536
0,9	1,0034	4,6	1,899	13,5	5,033	47	16,869	81	28,888
1,0	1,005	4,7	1,935	14,0	5,209	48	17,223	82	29,241
1,1	1,008	4,8	1,971	14,5	5,380	49	17,576	83	29,595
1,2	1,011	4,9	2,007	15,0	5,562	50	17,93	84	29,948
1,3	1,015	5,0	2,043	16,0	5,915	51	18,823	85	30,301
1,4	1,02	5,2	2,114	17	6,268	52	18,637	86	30,655
1,5	1,026	5,4	2,184	18	6,621	53	18,99	87	31,008
1,6	1,033	5,6	2,253	19	6,974	54	19,344	88	31,361
1,7	1,042	5,8	2,324	20	7,328	55	19,697	89	31,713
1,8	1,052	6,0	2,394	21	7,681	56	20,05	90	32,071
1,9	1,064	6,2	2,463	22	8,034	57	20,404	91	32,424
2,0	1,078	6,4	2,533	23	8,387	58	20,757	92	32,778
2,1	1,094	6,6	2,603	24	8,741	59	21,11	93	33,131
2,2	1,111	6,8	2,673	25	9,094	60	21,464	94	33,484
2,3	1,13	7,0	2,743	26	9,446	61	21,816	95	33,838
2,4	1,152	7,2	2,813	27	9,797	62	22,17	96	34,191
2,5	1,175	7,4	2,884	28	10,154	63	22,523	97	34,545
2,6	1,2	7,6	2,954	29	10,508	64	22,876	98	34,898
2,7	1,227	7,8	3,024	30	10,861	65	23,23	99	35,248
2,8	1,256	8,0	3,094	31	11,214	66	23,584	100	35,601
2,9	1,286	8,2	3,165	32	11,568	67	23,937	102	36,307
3,0	1,318	8,4	3,235	33	11,921	68	24,29	103	36,66
3,1	1,351	8,6	3,306	34	12,275	69	24,643	108	38,429
3,2	1,385	8,8	3,376	35	12,628	70	25,001	111	39,489
3,3	1,412	9,0	3,446	36	12,982	71	25,355		
3,4	1,456	9,2	3,517	37	13,335				
3,5	1,492	9,4	3,587						
3,6	1,529								

Коэффициент p находится по кривым (рис. 9,*а*), зависит от проводимости земли, частоты тока и определяется при $\theta = 0$ по параметру

$$n = 8{,}86 D_0 \sqrt{\sigma f \cdot 10^{-11}}, \tag{35}$$

где σ — проводимость почвы, 1/*ом·м*;

f — частота, *гц*;

D_0 — расстояние, *см*.

Проводимость почвы в различных районах страны имеет неодинаковую величину и находится в пределах 0,5—$\cdot 10^{-4}$ 1/*ом·м*.

Активное сопротивление на 1 *км* между проводами (из-за влияния земли)

$$R_{п} = 2{,}51 f p. \tag{36}$$

Здесь f — частота, *кгц*;

p — коэффициент, определяемый по кривым (рис. 9,*а*) по параметрам m и θ,

где

$$m = 8{,}86 D \sqrt{\sigma f \cdot 10^{-11}}; \tag{37}$$

$$\theta = \operatorname{arc\,tg} \frac{S}{D_0}. \tag{38}$$

2. Индуктивность линии зависит от диаметра проводов, их числа, расстояния, на котором они находятся друг от друга, и магнитной проницаемости материала проводов.

Индуктивность петли провод — земля с учетом влияния земли

$$L = L_\infty + \Delta L, \tag{39}$$

где L_∞ — индуктивность при бесконечно большой величине проводимости почвы ($\sigma = \infty$);

ΔL — увеличение индуктивности, обусловленное конечным значением проводимости земли.

Для симметричной линии

$$L_\infty = 0{,}2 \ln \frac{2D_0}{d} \text{ мгн/км}, \tag{40}$$

где d — диаметр провода.

Дополнительная индуктивность

$$\Delta L = 0{,}4 q \text{ мгн/км}, \tag{41}$$

где q — коэффициент, определяемый по кривым (рис. 9,*б*) в зависимости от n при $\theta = 0$.

Взаимная индуктивность проводов с учетом влияния земли

$$M = M' + \Delta M. \tag{42}$$

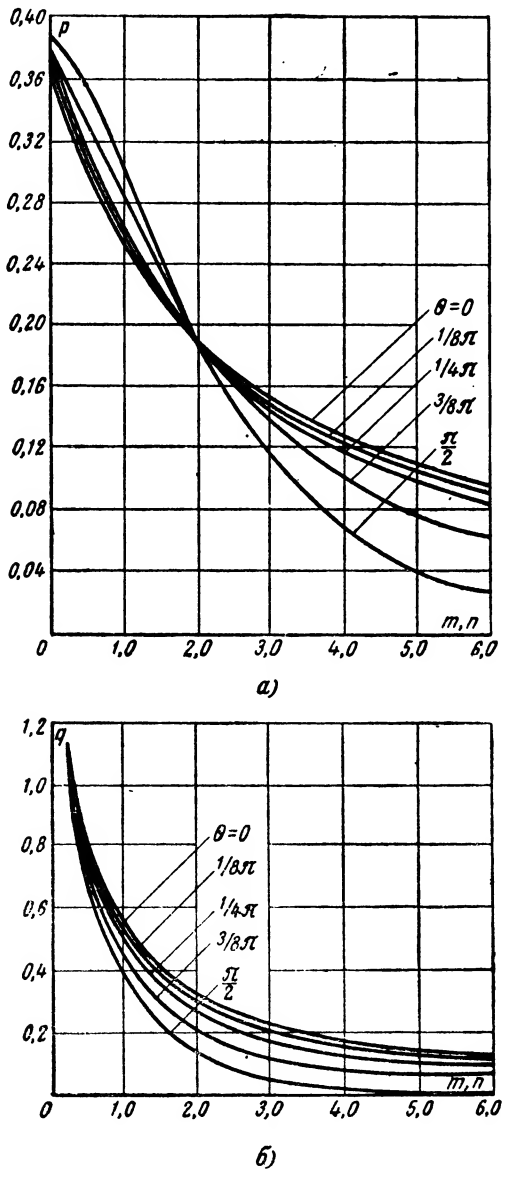


Рис. 9. Кривые для определения параметров p и q.

Здесь соответственно

$$M' = 0{,}2 \ln \frac{D}{S} \text{ мгн/км}; \quad \Delta M = 0{,}4q \text{ мгн/км}. \qquad (43)$$

Коэффициент q определяется по кривым (рис. 9,*б*) и параметрам m, θ.

3. Емкость линии зависит от диаметра проводов, расстояния между ними и относительно земли и дополнительной емкости, вносимой изоляторами подвески проводов.

Частичная емкость провода относительно земли находится по формуле

$$C_з = \frac{55{,}6 \cdot 10^{-3}}{\ln \frac{2D_0 D^2}{dS^2}} \text{ мкф/км}. \qquad (44)$$

Частичная емкость между проводами

$$C_п = \frac{55{,}6 \cdot 10^{-3} \ln \frac{D}{S}}{\ln \frac{2D_0 S}{dD} \cdot \ln \frac{2D_0 D^2}{dS^2}} \text{ мкф/км}. \qquad (45)$$

4. Проводимость изоляции воздушных линий мала, и поэтому в расчетах она принимается равной нулю.

Как уже отмечалось, наиболее распространенной схемой присоединения устройств связи и телемеханики к трехфазным цепям является система «фаза—земля».

При такой схеме присоединения в распространении сигналов вдоль линии участвуют и два других — соседних — провода. Установлено, что в симметричной трехфазной линии при однопроводном присоединении распространение электромагнитной волны происходит двумя путями. Один путь — так называемая система нулевой последовательности — образуется по схеме «провод — земля» (земляная волна), второй путь — по системе «провод — два провода» (междуфазная волна). Параметры линии для двух типов волн различны.

5. Вторичные параметры линии определяются отдельно для земляной и междуфазной волн:

$$\left.\begin{aligned} Z_о &= \sqrt{\frac{R_о + j\omega L_о}{j\omega C_о}}; \quad \gamma_о = \sqrt{(R_о + j\omega L_о)\, j\omega C_о}; \\ Z_ф &= \sqrt{\frac{R_ф + j\omega L_ф}{j\omega C_ф}}; \quad \gamma_ф = \sqrt{(R_ф + j\omega L_ф)\, j\omega C_ф}, \end{aligned}\right\} \qquad (46)$$

где

$$\left.\begin{aligned} R_о &= R_f + R_з + 2R_п; \; R_ф = R_f + R_з - R_п; \\ L_о &= L + 2M; \; L_ф = L - M; \\ C_о &= C_з; \; C_ф = C_з + 3C_п. \end{aligned}\right\} \qquad (47)$$

Для большинства случаев $R_о \ll \omega L_о$ и $R_ф \ll \omega L_ф$, поэтому выражения для вторичных параметров могут быть значительно упрощены;

$$\left.\begin{aligned} Z_о &= \sqrt{\frac{L_о}{C_о}}; \; Z_ф = \sqrt{\frac{L_ф}{C_ф}}; \\ \beta_о &= \frac{R_о}{2Z_о}; \; \beta_ф = \frac{R_ф}{2Z_ф}; \\ \alpha_о &= \omega\sqrt{L_о C_о}; \; \alpha_ф = \omega\sqrt{L_ф C_ф}; \\ v_о &= \frac{1}{\sqrt{L_о C_о}}; \; v_ф = \frac{1}{\sqrt{L_ф C_ф}}. \end{aligned}\right\} \qquad (48)$$

Величина волнового сопротивления несколько увеличивается (до 10%) с уменьшением диаметра проводов и рабочего напряжения линии, и наоборот.

В линиях с проводами из цветных металлов $\frac{\beta_о}{\beta_ф} = 10 \div 15$. Величина затухания междуфазной волны незначительна ($\sim 5 \cdot 10^{-3}$ *неп/км*), в то время как затухание волны нулевой последовательности колеблется в зависимости от типа линии и частоты в пределах $30 \cdot 10^{-3}$—$100 \cdot 10^{-3}$ *неп/км*. Фазовые постоянные $\alpha_о$ и $\alpha_ф$ в любых линиях в рассматриваемом диапазоне частот имеют одинаковый порядок: 1—3 *рад/км*.

Способ подвески проводов и рабочее напряжение линии на вторичные параметры заметного влияния не оказывают. При необходимости более подробного знакомства с характеристиками воздушных распределительных электрических сетей более исчерпывающие сведения можно получить в [Л. 25].

7. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ШАХТЫ

Конструкции контактной сети шахты как линии связи довольно сложны и разнообразны и зависят от ряда причин: количества проводников (троллей, рельсы, кабели, трубы и др.), их сечения, материала и взаимного распо-

ложения, размеров выработки, проводимости горных пород и, наконец, от крепления выработки (деревянное, металлическое).

В результате анализа контактной сети шахты как линии связи было установлено, что, несмотря на свою многопроводную конструкцию, контактная сеть шахты подобна однопроводной линии. В качестве прямого провода этой линии служит группа изолированных от грунта, но соеди-

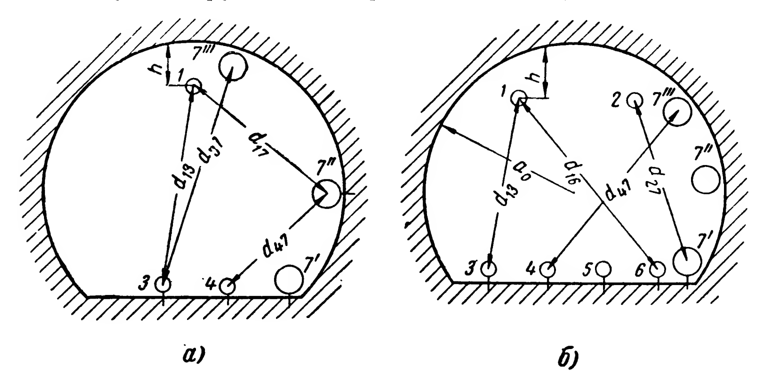


Рис. 10. Расположение проводов контактной сети шахты.
а — однопутный участок, *б* — двухпутный участок линии.
1, *2* — троллей; *3*, *4*, *5*, *6* — рельс; *7'*, или *7''*, или *7'''* — дополнительный проводник.

нённых перемычками проводов (один или два контактных провода), а в качестве обратного — горные породы и группа проводников, лежащих на грунте (рельсы, трубы, бронированные кабели, тросы). Расчет первичных и вторичных параметров такой линии приведен в [Л. 1 и 13].

1. *Активное сопротивление линии.* Для наиболее общего случая двухпутного участка контактной сети (рис. 10,*б*) при наличии на нем дополнительного произвольно расположенного проводника (*7'*, или *7''*, или *7'''*) активное сопротивление линии

$$R=\left[\beta_о(1-A_р-A_п)^2+\frac{\beta_р}{2n}A_р^2+\beta_п A_п^2+\frac{\beta_т}{n}\right]1{,}26f\ ом/км, \tag{49}$$

где f — частота, *кгц*;

$$A_р\approx\frac{\alpha_о\ln\dfrac{d_{пр}\cdot d_{тп}}{a_п d_{тр}}+\ln\dfrac{a_о}{d_{тр}}\cdot\ln\dfrac{a_о}{a_п}-\ln\dfrac{a_о}{d_{пр}}\cdot\ln\dfrac{a_о}{d_{тп}}}{\alpha_о\ln\dfrac{d_{пр}^2}{a_р a_п}+\ln\dfrac{a_о}{a_р}\ln\dfrac{a_о}{a_п}}; \tag{50}$$

$$A_{\text{п}} \approx \frac{\alpha_{\text{о}} \ln \dfrac{d_{\text{пр}} d_{\text{тр}}}{a_{\text{р}} d_{\text{тп}}} + \ln \dfrac{a_{\text{о}}}{d_{\text{тп}}} \cdot \ln \dfrac{a_{\text{о}}}{a_{\text{р}}} - \ln \dfrac{a_{\text{о}}}{d_{\text{пр}}} \cdot \ln \dfrac{a_{\text{о}}}{d_{\text{тр}}}}{\alpha_{\text{о}} \ln \dfrac{d_{\text{пр}}^2}{a_{\text{р}} a_{\text{п}}} + \ln \dfrac{a_{\text{о}}}{a_{\text{р}}} \cdot \ln \dfrac{a_{\text{о}}}{a_{\text{п}}}}; \qquad (51)$$

$d_{\text{тр}}$, $d_{\text{пр}}$, $d_{\text{тп}}$ — расстояния между троллеем и рельсом, проводником и рельсом, троллеем и проводником;

$a_{\text{о}}$, $a_{\text{т}}$, $a_{\text{п}}$ и $a_{\text{р}}$ — радиусы горной выработки, эквивалентного троллея, дополнительного проводника (проложенный в выработке кабель, труба, трос и т. п.), круглого провода, эквивалентного всем рельсам;

$$\left.\begin{aligned} a_{\text{т}} = \sqrt{a_1 d_{12}};\ a_{\text{р}} = \sqrt[8]{a_3^2\, d_{34} d_{35} d_{36} d_{45} d_{46} d_{56}}; \\ d_{\text{тр}} = \sqrt[4]{d_{13}\, d_{14}\, d_{15}\, d_{16}};\quad d_{\text{пр}} = \sqrt[4]{d_{37} d_{47} d_{57} d_{67}}; \\ d_{\text{тп}} = \sqrt{d_{17} d_{27}}; \end{aligned}\right\} \qquad (52)$$

a_1 — радиус троллея;

a_3 — радиус рельса;

n — число путей;

$\beta_{\text{о}}$, $\beta_{\text{р}}$, $\beta_{\text{п}}$ и $\beta_{\text{т}}$ — соответственно активные потери в грунте, рельсах, проводнике и троллеях [Л.1];

$$\alpha_{\text{о}} \approx \left(0{,}11 + \ln \frac{1}{k_{\text{о}}}\right)(1 + k_{\text{о}}^2); \qquad (53)$$

$$\beta_{\text{о}} = \frac{\pi}{4}(1 - 0{,}6 k_{\text{о}}). \qquad (54)$$

Здесь

$$k_{\text{о}} = \sqrt{\omega \mu_{\text{о}} \sigma_{\text{о}} a_{\text{о}}}; \qquad (55)$$

$\mu_{\text{о}}$ — магнитная проницаемость грунта, *гн/м*;

$\sigma_{\text{о}}$ — проводимость грунта, 1/*ом·м*;

$a_{\text{о}}$ — радиус горной выработки, *м*.

Для однопутного участка (рис. 10,*а*) выражение (49) имеет такой же вид, но при

$$\left.\begin{aligned} a_{\text{т}} = a_1;\ a_{\text{р}} = \sqrt{a_3 d_{34}};\ d_{\text{тр}} = d_{13} = d_{14}; \\ d_{\text{тп}} = d_{17};\ d_{\text{пр}} = \sqrt{d_{37} d_{47}};\ n = 1. \end{aligned}\right\} \qquad (56)$$

При отсутствии дополнительного проводника 7 в выработке коэффициент $A_п = 0$ и

$$R = 1{,}26f\left[\beta_о(1 - A_р)^2 + \frac{\beta_р}{2n}A_р^2 + \frac{\beta_т}{n}\right] \; ом/км, \quad (57)$$

где

$$A_р \approx \frac{\alpha_о + \ln\dfrac{a_о}{d_{тр}}}{\alpha_о + \ln\dfrac{a_о}{a_р}}. \quad (58)$$

Зависимость величины активного сопротивления линии от ее конструкции и частоты тока представлена в виде кривых на рис. 11. Как видно из рисунка и приведенных формул, сопротивление зависит от проводимости горных пород, в которых пройдена выработка, размеров выработки, от сечения проводов, их количества и взаимного рас-

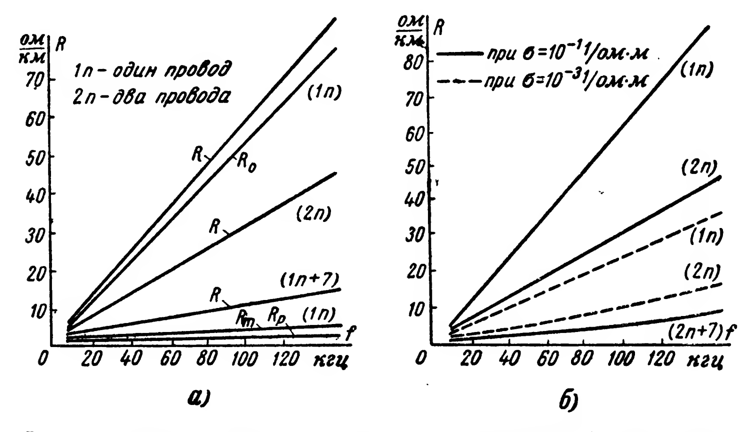


Рис. 11. Кривые активного сопротивления контактной сети шахты.

положения и в значительной степени от распределения тока между неизолированными проводниками и грунтом.

В том случае, когда дополнительные проводники в выработке расположены далеко от контактного провода (проложены по основанию выработки) или вообще отсутствуют, доля потерь в контактном проводе (троллее) и рельсах по сравнению с потерями в грунте невелика. Сопротивление $R_т$ и $R_р$ составляет единицы ом, а сопротивление, обусловленное потерями в грунте, R_0 — десятки ом

(рис. 11,*а*). По этой причине можно принять для линии, имеющей дополнительные проводники:

$$R = 1{,}26 f \beta_о (1 - A_р - A_п)^2 \ ом/км \qquad (59)$$

и для линии, не имеющей дополнительных проводников,

$$R = 1{,}26 f \beta_о (1 - A_р)^2 \ ом/км. \qquad (60)$$

Исключение составляют случаи, когда линия имеет большое количество дополнительных проводников, если выработка пройдена в горных породах, имеющих большую проводимость (железная руда), и, наконец, при креплении выработки железными опорами. В таких случаях потери в грунте невелики и соизмеримы с активными потерями в проводах (кривые *1п+7* и *2п+7* на рис. 11,*а* и *б*).

С увеличением частоты потери в грунте быстро растут. С одной стороны, это объясняется действием поверхностного эффекта. С другой стороны, обратный ток все больше протекает не по металлическим рельсам и проводникам, а по грунту, растет величина $(1 - A_р - A_п)$, увеличивая тем самым активные потери в грунте.

Необходимо также отметить, что увеличение проводимости грунта при неизменных остальных условиях в диапазоне частот 10—150 *кгц* приводит не к уменьшению, а к увеличению потерь в грунте, что объясняется перераспределением обратного тока.

2. *Индуктивность линии.* Для наиболее общего случая (см. рис. 10,*б*)

$$L = 0{,}2 \cdot 10^{-3} \left[\left(\ln \frac{a_о}{a_т} - A_р \ln \frac{a_о}{d_{тр}} - A_п \ln \frac{a_о}{d_{тп}}\right) + \alpha_о (1 - A_р - A_п) + \frac{\alpha_т}{n}\right] \frac{гн}{км}, \qquad (61)$$

где $\alpha_т$, $\alpha_о$ — индуктивность, вносимая троллеем и грунтом;

$\alpha_т$, как и $\alpha_о$, определяется по формуле (53) с учетом проводимости $\sigma_т$;

$A_р$ и $A_п$ определяются по формулам (50) и (51).

При отсутствии дополнительного проводника *7* в выработке

$$L = 0{,}2 \cdot 10^{-3} \left[\left(\ln \frac{a_о}{a_т} + A_р \ln \frac{a_о}{d_{тр}}\right) + \alpha_о (1 - A_р) + \frac{\alpha_т}{n}\right] \frac{гн}{км}, \qquad (62)$$

где коэффициент $A_р$ определяется по формуле (58).

Для большинства практических расчетов приведенные выражения для L могут быть значительно упрощены.

Производя количественную оценку каждого члена выражений (61) и (62), в результате подстановки в них известных данных нетрудно убедиться, что наибольшим является первый член. Сумма всех других составляющих значительно меньше.

Представим формулы (61) и (62) в виде:

$$L = 0{,}2 \ln \frac{a_о}{a_т} + k_L = L_1 + k_L \frac{мгн}{км}, \qquad (63)$$

где

$$k_L = 0{,}2 \left[\frac{\alpha_т}{n} + \alpha_о (1 - A_р - A_п) - A_р \ln \frac{a_о}{d_{тр}} - A_п \ln \frac{a_о}{d_{тп}} \right] \frac{мгн}{км} \qquad (64)$$

для линии на рис. 10,*б* и

$$k_L = 0{,}2 \left[\frac{\alpha_т}{n} + \alpha_о (1 - A_р) + A_р \ln \frac{a_о}{d_{тр}} \right] \frac{мгн}{км} \qquad (65)$$

для линии на рис. 10,*а*.

Проанализируем зависимость составляющих выражения (63) от конструктивных особенностей линии. На рис. 12 показаны значения этих составляющих для двух крайних случаев: при отсутствии в выработке каких-либо

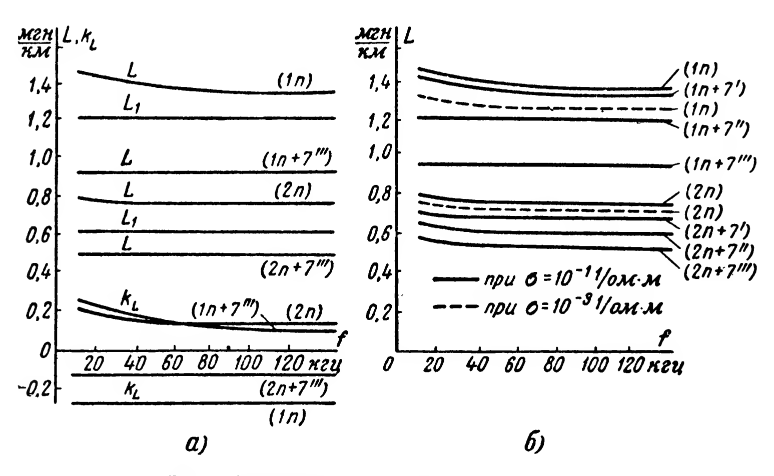


Рис. 12. Кривые индуктивности линии.

дополнительных металлических проводников (кривые *1п* и *2п*) и при наличии в выработке проводника большого сечения ⌀300 *мм*, расположенного в непосредственной близости (~0,3 *м*) от троллея (кривые *1п*+*7‴* и *2п*+*7‴*). Диаметры выработки типовые: 2,5 *м* (однопутный участок *1п*) и 4,0 *м* (двухпутный участок *2п*), проводимость горных пород $\sigma \approx 0,1$ 1/*ом·м*.

Как видно из рисунка, расчет L с определенным допущением может быть произведен с учетом только первого слагаемого формулы (63):

$$L \approx 0,2 \ln \frac{a_0}{a_т} \ \frac{мгн}{км}. \tag{66}$$

Погрешность при расчете по приближенной формуле находится в пределах ±20%. Максимальная величина погрешности определяется предельными нетиповыми случаями: +20% — при малой проводимости грунта и отсутствии в выработке дополнительных металлических проводников и —20%, наоборот, при наличии дополнительных проводников в выработке и большой проводимости грунта.

В некоторых наиболее распространенных случаях погрешность стремится к нулю. Учитывая это, а также различия в конструкции рассматриваемой линии вдоль ее длины, приводящие как к увеличению, так и к уменьшению величины k_L, формулу (66) можно рекомендовать для большинства практических расчетов.

Индуктивность двухпутного участка линии, как видно из рис. 12, почти в 2 раза меньше, чем индуктивность однопутного. Присутствие дополнительных проводящих систем также приводит к уменьшению индуктивности. Физически это объясняется тем, что по дополнительному проводу, особенно если он расположен ближе к троллею, чем к рельсам, проходит значительная доля обратного тока, что эквивалентно уменьшению расстояния между прямым и обратным проводами.

Зависимость индуктивности контактной сети от частоты тока и проводимости грунта сравнительно слабая. Так, например, изменение проводимости в 100 раз приводит к изменению индуктивности всего лишь на 10%. Изменение частоты в рассматриваемом диапазоне приводит к уменьшению индуктивности всего на несколько процентов (вследствие поверхностного эффекта в проводах и грунте).

3. *Емкость линии.* Для двухпутного участка контактной сети (см. рис. 10,*б*)

$$C = \frac{55{,}6 \times 10^{-9}}{\ln \frac{2h}{a_т}\left(1 + \frac{h}{2a_0}\right) + \ln \frac{a_0}{d_{12}} \sqrt{1 - 2\frac{d_{10}d_{20}}{a_0^2}\cos\alpha_{12} + \frac{d_{10}^2 d_{20}^2}{a_0^4}}} + C_{из}, \; ф/км, \qquad (67)$$

где h — расстояние от троллея до кровли выработки;

$C_{из} = mC'_{из}$ — емкость, вносимая изоляторами подвески троллея;

m — число изоляторов на 1 *км* линии (в среднем $m = 200$);

$C'_{из}$ — емкость одного изолятора;

d_{10} — расстояние между осями горной выработки и первого контактного провода;

d_{20} — расстояние между осями горной выработки и второго контактного провода;

a_0 — радиус горной выработки;

α_{12} — угол в центре выработки, образованный прямыми, направленными через оси контактных проводов.

Емкость изолятора зависит от его типа. Орешковый изолятор имеет $C'_{из} = 0{,}3 \cdot 10^{-10}$ *ф*, а изолятор типа ТФ-2

$$C'_{из} = 0{,}6 \cdot 10^{-10} \; ф.$$

Для однопутного участка контактной сети (см. рис. 10,*а*)

$$C = \frac{55{,}6 \cdot 10^{-9}}{\ln \frac{2h}{a_т}\left(1 + \frac{h}{2a_0}\right)} + C_{из} \; ф/км. \qquad (68)$$

При типовых размерах горной выработки и контактной сети для ориентировочных расчетов можно принять

$$C = \frac{55{,}6 \cdot 10^{-9}}{\ln \frac{2h}{a_т}} + C_{из} \; ф/км. \qquad (69)$$

Погрешность δ расчета, произведенного по приближенной формуле, находится в пределах 5—10%. Величина

погрешности зависит от места расположения троллея в выработке. При приближении троллея к центру выработки ($h/a_0 \to 1$) погрешность увеличивается, и наоборот, при $h/a_0 \to 0$ погрешность уменьшается. Зависимость величины погрешности от места расположения троллея в выработке показана на рис. 13.

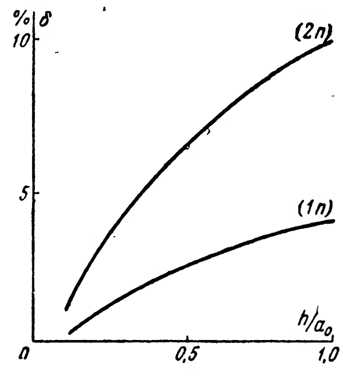


Рис. 13. Кривые погрешности расчета емкости линии.

4. *Проводимость изоляции линии.* Проводимость изоляции контактной сети шахты определяется экспериментально. В зависимости от состояния линии она может колебаться в широких пределах ($20 \div 0,1) \cdot 10^{-4}$ *1/ом·км*. В среднем для однопутного участка можно принять $G_1 \approx 0,6 \cdot 10^{-3}$ *1/ом·км* и для двухпутного участка $G \approx 1,2 \cdot 10^{-3}$ *1/ом·км* (т. е. вдвое больше).

5. *Вторичные параметры контактной сети шахты.* Избыток влаги и запыленность воздуха в шахте в значительной степени ухудшают изоляцию троллеев по отношению к грунту. Проводимость изоляции контактной сети становится такой, что начинает выполняться условие неискаженной передачи сигналов по линии:

$$RC = LG. \qquad (70)$$

Это позволяет вести расчет вторичных параметров по следующим формулам:

волновое сопротивление

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \text{ ом}; \qquad (71)$$

километрическое затухание

$$\beta = \frac{R}{Z_c} \text{ неп/км}. \qquad (72)$$

Как видно из рис. 14, величины Z_c и β в значительной степени зависят от конструктивных особенностей контактной сети. Для однопутного участка волновое сопротивление линии может быть принято равным 250 *ом*, а в случае двухпутного участка — 110 *ом*.

Когда контактная сеть содержит дополнительные проводящие системы (кривые: $1n+7''$; $1n+7'''$; $2n+7'$ и т. п. на рис. 14), волновое сопротивление немного меньше указанных значений. Снижение величины волнового сопротивления происходит за счет уменьшения индуктивности.

Величина километрического затухания контактной сети уменьшается с введением в выработку каких-либо допол-

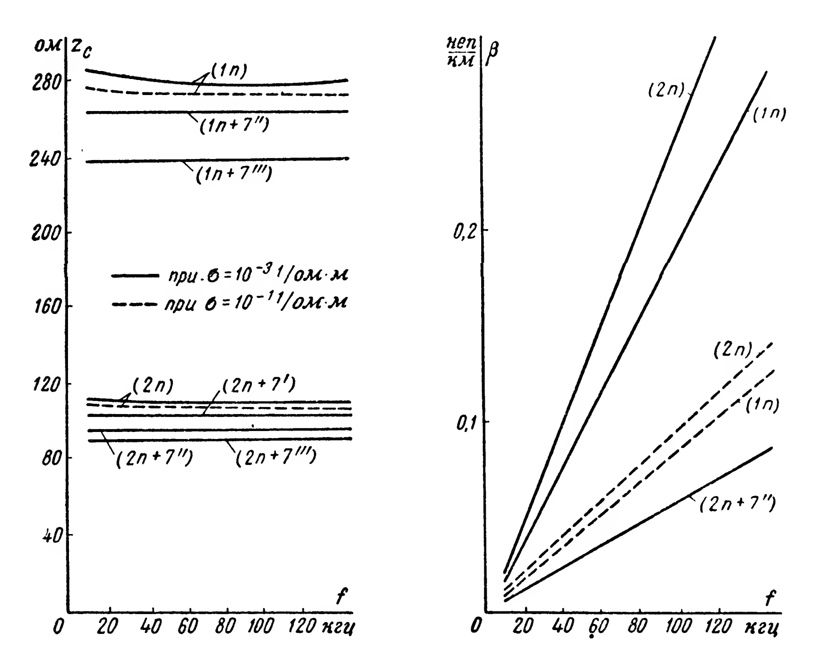


Рис. 14. Кривые волнового сопротивления и километрического затухания линии.

нительных металлических проводников (кривая $2n+7''$ на рис. 14), с увеличением их количества и сечения, а также при расположении этих проводников ближе к контактному проводу. Большое влияние на величину β оказывают проводимость горных пород и тип крепления выработки. При креплении железными опорами километрическое затухание линии в несколько раз меньше, чем при креплении деревянными опорами. Уменьшение километрического затухания во всех этих случаях происходит в результате снижения величины активного сопротивления линии.

8. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КАБЕЛЬНЫХ СИЛОВЫХ ЛИНИЙ

К настоящему времени достаточно подробно изучены кабельные линии электропередач с номинальным напряжением выше 10 *кв* [Л. 24]. Кабели высокого напряжения (10, 20 *кв* и выше) имеют концентрическую конструкцию с отдельно изолированными токоведущими жилами и отдельными металлическими оболочками (обратные провода).

Таким образом, определение первичных параметров таких кабелей аналогично расчету параметров концентрических кабелей связи:

$$R = R_1 + R_2 = \frac{10^3}{2\pi r_1 \sigma_1 \xi_1} + \frac{10^3}{2\pi r_2 \sigma_2 \xi_2} \ \text{ом/км}; \tag{73}$$

$$L = \frac{\mu_a}{2\pi} \cdot 10^3 \ln \frac{r_2}{r_1} \ \text{гн/км}; \tag{74}$$

$$C = \frac{2\pi \varepsilon_a \cdot 10^3}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \ \text{ф/км}; \tag{75}$$

$$G = \omega C \operatorname{tg} \delta \ \frac{1}{\text{ом} \cdot \text{км}}. \tag{76}$$

Здесь r_1 и r_2 — радиус токоведущего провода и внутренний радиус оболочки, *м*;

σ_1 и σ_2 — проводимость провода и оболочки, 1/*ом·м*;

δ — угол диэлектрических потерь изоляции;

ε_a — абсолютная диэлектрическая проницаемость, *ф/м*;

μ_a — абсолютная магнитная проницаемость провода (жилы) и оболочки кабеля, *гн/м*;

ξ_1 и ξ_2 — эквивалентная глубина проникновения поля в провод и оболочку, *м*:

$$\xi_{1,2} = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_a \sigma_{1,2}}}.$$

Определение вторичных параметров силовых кабелей в диапазоне частот 10—150 *кгц* возможно по упрощенным формулам:

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \ \text{ом}; \tag{77}$$

$$\beta = \frac{R}{2Z_c} + \frac{GZ_c}{2} \ \text{неп/км}; \tag{78}$$

$$\alpha = \omega \sqrt{LC} \ \text{рад/км}. \tag{79}$$

Расчетные значения вторичных параметров различных по сечению кабелей типа ОСБ 20 *кв* при частоте $f = 100$ *кгц* приведены в табл. 2. Полученные величины достаточно точно согласуются с экспериментальными данными.

Таблица 2

S, $мм^2$	r_2/r_1	Z_c, *ом*	β, *неп/км*	α, *рад/км*	Примечание
25	11,15/3,15	40,5	0,157	3,92	Для сетей с незаземленной нейтралью
70	13,3/5,3	29,4	0,158	3,92	
120	14/7	22,3	0,174	3,92	
120	13/7	19,9	0,195	3,92	Для сетей с заземленной нейтралью

Волновое сопротивление кабелей ОСБ уменьшается с увеличением сечения, а также с уменьшением толщины изоляции и находится в пределах 20—40 *ом*.

Километрическое затухание мало зависит от конструкции кабеля. Значительное влияние на затухание оказывают диэлектрические потери в изоляции.

Частотная характеристика тангенса угла потерь для новых кабелей с бумажно-масляной изоляцией приведена на рис. 15. Как видно из рисунка, в среднем можно принять, что $\operatorname{tg}\delta \approx 0{,}03$.

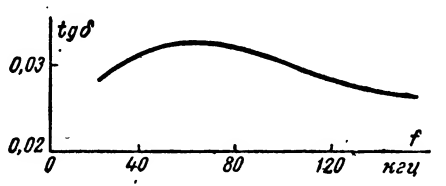


Рис. 15. Частотная зависимость тангенса угла потерь кабеля ОСБ 35 *кв* с пропитанной бумажной изоляцией.

При наличии в кабелях экранов значения электрических параметров отличаются от расчетных. Применяемые в кабелях экраны бывают двух типов: металлические и полупроводящие. Влияние первых сказывается на величине активного сопротивления R, а вторых — на изменении проводимости изоляции G.

Для правильной оценки электрических параметров кабелей, имеющих экраны, необходимо в расчетные формулы (73)—(79) вводить поправочные коэффициенты [Л. 24]. Особенно большое влияние оказывают полупроводящие экраны, которые приводят к значительному возрастанию проводимости изоляции кабеля и, следовательно, к увеличению затухания.

В меньшей степени изучены многожильные силовые кабели с пропитанной бумажной изоляцией типов СБ, СГ, СА и т. п. Наиболее распространены трехжильные кабели на напряжения 1—10 *кв* (рис. 16,*а*). Реже встречаются двухжильные и четырехжильные кабели, которые изготовляются на напряжение 1 *кв*. Выпускаются многожильные кабели с медными и алюминиевыми жилами, круглого и секторного сечений. Сечение токопроводящих жил может колебаться в зависимости от назначения кабеля в преде-

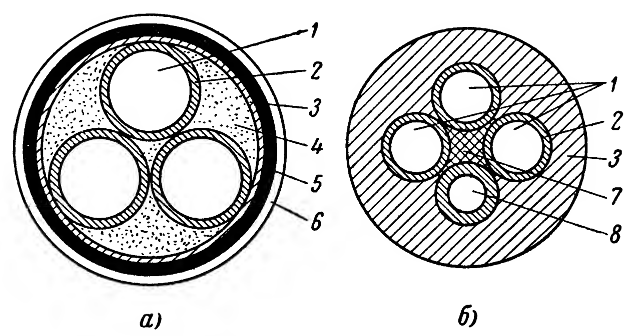


Рис. 16. Конструкция трехфазного силового кабеля.
а — бронированного типа СБ; *б* — гибкого типа ГРШС.
1 — токоведущая жила; *2* — жильная изоляция; *3* — поясная изоляция; *4* — заполнение; *5* — свинцовая оболочка; *6* — броня; *7* — резиновый сердечник; *8* — заземляющая жила.

лах 2,5—240 *мм*². Толщина изоляции увеличивается с ростом напряжения.

При энергоснабжении нестационарных объектов (горные машины, экскаваторы и т. п.) часто применяются гибкие резиновые кабели (рис. 16,*б*). Гибкие кабели рассчитаны, как правило, на рабочее напряжение до 0,5 *кв*. Изготавливаются эти кабели двух-, трех- и многожильными. Двух- и трехжильные кабели выпускаются также и с дополнительной заземляющей жилой. Номинальное сечение токопроводящих жил 4—70 *мм*². Изоляция изготавливается из резины РТН-2 на рабочее напряжение 200—500 *в*. Для защиты кабелей от механических повреждений служит шланговая оболочка. Для всех сечений и типов кабеля применяется нормальная шланговая резина типа РШ-1.

В результате измерений различных по сечению гибких и бронированных кабелей в диапазоне частот 10—150 *кгц* были получены их электрические параметры.

1. *Волновое сопротивление*. Величина волнового сопротивления Z_c гибких кабелей при схеме присоединения

«фаза—земля» находится в пределах 60—80 *ом* и мало зависит от частоты тока и сечения кабеля. При схеме присоединения «три фазы — земля» величина волнового сопротивления на 30% меньше (рис. 17). С уменьшением сечения кабеля Z_c увеличивается, но незначительно.

Волновое сопротивление гибких кабелей может несколько измениться вследствие непостоянства километрической емкости, величина которой зависит от диэлектриче-

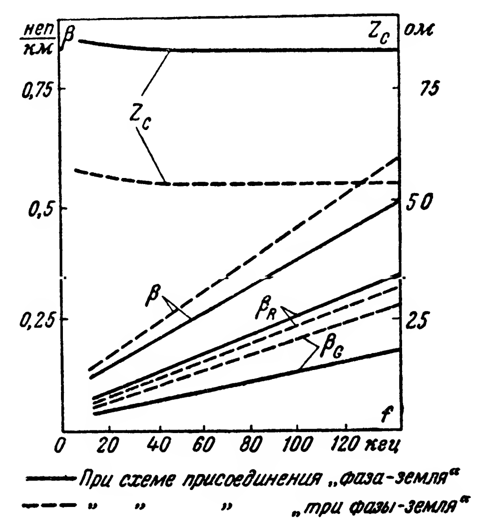


Рис. 17. Кривые затухания и волнового сопротивления гибкого кабеля типа ГРШС.

ской проницаемости резиновой изоляции кабеля. Результаты измерений в заводских условиях показали, что обычно значение относительной диэлектрической проницаемости находится в пределах 3—4. Но в процессе эксплуатации кабеля, а также из-за отклонения в технологии изготовления изоляции относительная диэлектрическая проницаемость может возрасти до 6 и даже выше.

Волновое сопротивление бронированных трехфазных кабелей типа СБ значительно ниже, чем у гибких, и в зависимости от сечения кабеля равно 20—30 *ом*. Величина Z_c таких кабелей более стабильна. Относительная диэлектрическая постоянная бронированных кабелей почти постоянна и в среднем равна 4. С уменьшением сечения кабеля волновое сопротивление несколько увеличивается. С изменением частоты тока, условий и времени эксплуата-

ции волновое сопротивление бронированных кабелей меняется незначительно.

2. *Километрическое затухание.* Расчет затухания β различных кабелей в рассматриваемом диапазоне частот может быть выполнен по формуле

$$\beta = \beta_G + \beta_R = \frac{GZ_c}{2} + \frac{R}{2Z_c} \textit{ неп/км},$$

где β_G — затухание за счет токов утечки;

β_R — затухание за счет активных потерь.

На рис. 17 показаны кривые затухания β и ее составляющие для кабеля типа ГРШС 4×4.

Километрическое затухание гибких кабелей в большой степени зависит от качества изоляции кабеля, т. е. от величины $G = \omega C \operatorname{tg} \delta$. Тангенс угла потерь резиновой изоляции гибких кабелей довольно большой и может меняться в пределах 0,05—0,3.

Величина $\operatorname{tg} \delta$ зависит от технологии вулканизации, от количества серы в резине и, самое главное, от условий и времени эксплуатации кабеля.

Километрическое затухание β гибкого кабеля может изменяться в широких пределах: 0,2—3,0 *неп/км*, главным образом в зависимости от состояния изоляции. Километрическое затухание снижается с уменьшением частоты и с увеличением сечения кабеля. Величина β резко возрастает (в указанных пределах) с увеличением срока эксплуатации, особенно при наличии условий повышенной влажности, запыленности, механических воздействий и т. п.

Влияние эксплуатационных условий на электрические параметры кабеля заключается прежде всего в изменении изоляционных свойств резины кабеля. В результате неоднократных скруток, растяжений, изгибов кабеля и других механических воздействий происходит постепенное разрушение не только изоляции, но даже и жил кабеля.

От схемы присоединения величина β почти не зависит.

Для стабилизации параметров гибких кабелей при упротнении их высокочастотными каналами необходимо повышение качества изоляционных свойств резины. В этом направлении в настоящее время работает Томский филиал НИИКП.

Значительно меньше по величине и вместе с тем более стабильно километрическое затухание бронированных кабелей ($\beta \approx 0{,}1 \div 0{,}5$ *неп/км*).

Тангенс угла потерь у бронированных кабелей, имеющих бумажную пропитанную изоляцию, много меньше, чем у гибких кабелей. Величина $\operatorname{tg}\delta$ обычно лежит в пределах 0,01—0,02 и относительно стабильна.

Километрическое затухание кабелей с алюминиевыми жилами несколько выше, чем у кабелей с медными жилами.

9. ВХОДНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СИЛОВЫХ СЕТЕЙ

Электрооборудование распределительных силовых сетей чрезвычайно разнообразно и зависит от типа и назначения силовой сети, величины рабочего напряжения и пр.

Наиболее характерными основными элементами электрооборудования являются: электродвигатели, силовые трансформаторы, генераторы, выключатели. Эти элементы имеют мощности от нескольких до нескольких сотен и даже тысяч киловольт-ампер. Кроме отдельных установок, в распределительную сеть могут включаться и целые агрегаты (экскаваторы, электровозы, электроподстанции и т. п.), состоящие из нескольких электроустановок, включенных по той или иной схеме.

На рис. 18,*а* показаны значения входного сопротивления электродвигателей мощностью 4,5—30 *квт* при различных схемах присоединения. Как видно, величина входного сопротивления зависит от мощности электродвигателя и частоты тока высокочастотного сигнала. С увеличением мощности и частоты входное сопротивление электродвигателя, как правило, уменьшается. Уменьшение величины входного сопротивления наблюдается также при соединении фазных выводов между собой (рис. 18,*б*). Сопротивление некоторых электродвигателей при схеме присоединения «три фазы—земля» может быть значительно меньше, чем при схеме «фаза—земля».

Аналогичная зависимость свойств входного сопротивления [Л. 25] наблюдается и у силовых трансформаторов и генераторов (рис. 18,*в*). Входное сопротивление с увеличением частоты уменьшается.

В большинстве случаев входное сопротивление имеет емкостный характер и в расчетах может считаться чисто реактивным. Оно определяется емкостями между витками обмоток, витками и корпусом агрегата, между отдельными деталями и пр. В некоторых случаях заметны индуктивная и активная составляющие.

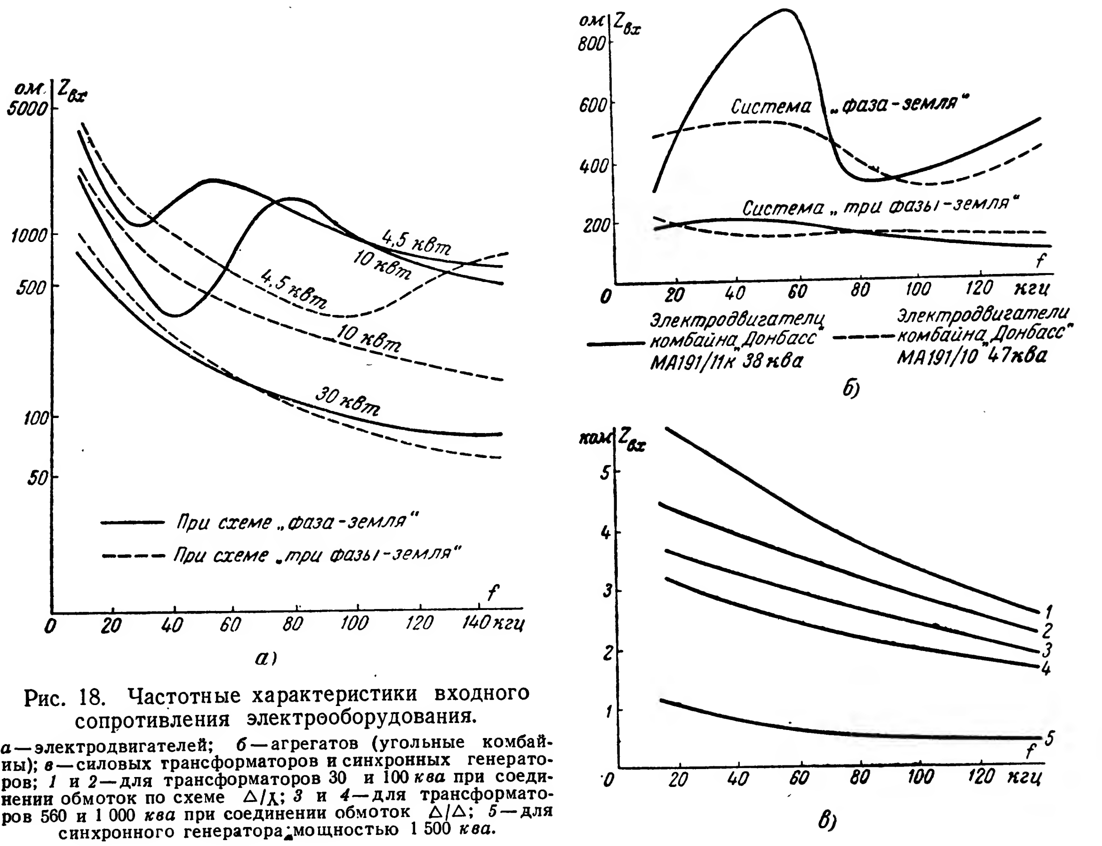


Рис. 18. Частотные характеристики входного сопротивления электрооборудования.

а — электродвигателей; *б* — агрегатов (угольные комбайны); *в* — силовых трансформаторов и синхронных генераторов; *1* и *2* — для трансформаторов 30 и 100 *ква* при соединении обмоток по схеме $\Delta/\curlywedge$; *3* и *4* — для трансформаторов 560 и 1 000 *ква* при соединении обмоток Δ/Δ; *5* — для синхронного генератора мощностью 1 500 *ква*.

С увеличением мощности возрастают габариты как отдельных деталей, так и всего устройства, вследствие чего увеличиваются частичные емкости и уменьшается входное сопротивление.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ ОБРАБОТКА СИЛОВОЙ ЦЕПИ

В схему канала связи, образованного по силовой цепи, помимо всех элементов, обычных для проводных линий связи, — генераторов, фильтров, модуляторов и пр., входит ряд дополнительных устройств высокочастотной обработки. Эти устройства необходимы для безопасности работы обслуживающего персонала и аппаратуры ТУ—ТС, обеспечения достаточного радиуса действия канала и снижения уровня электрических помех.

Силовые распределительные сети сооружаются без учета требований, предъявляемых высокочастотными каналами. Как видно из рис. 4, распределительная силовая сеть является чрезвычайно неоднородной линией связи. Неоднородность линии в данном случае создают силовые трансформаторы, электродвигатели и другое оборудование. Все эти элементы сети, особенно низкоомные, вносят определенные потери при передаче телемеханических сигналов и тем самым значительно сокращают радиус действия канала связи. У всех низкоомных элементов необходима установка высокочастотных заградителей, которые повышают их входное сопротивление до требуемой величины и тем самым значительно сокращают утечку тока высокой частоты. На входе маломощных элементов (ток менее 10 *а*) устанавливаются обычные высокочастотные дроссели.

Для обеспечения работы канала по всем направлениям силовой сети на разъединителях в местах разрыва цепи необходима установка обходных устройств (высокочастотных перемычек).

Рассмотрим несколько подробнее основные устройства для высокочастотной обработки распределительной силовой сети.

10. УСТРОЙСТВА ПРИСОЕДИНЕНИЯ

Присоединение аппаратуры ТУ — ТС к силовой цепи осуществляется при помощи специальных устройств. Устройство присоединения (см. рис. 4) состоит из переходного устройства (ПУ) и соединительных линий (СЛ).

Переходное устройство в зависимости от рабочего напряжения силовой сети и ее конструктивных особенностей может выполняться в нескольких вариантах.

Широкое применение находит гальванический способ присоединения через специальные разделительные конденсаторы связи. Такое присоединение обеспечивает минимум потерь для телемеханических сигналов при высокой надежности и стабильности устройства. Переходное устройство в этом случае может выполняться по схеме «фаза—земля», «фаза—фаза», «две фазы—фаза» и «три фазы—земля» (см. рис. 5,*а*—*г*).

В цепях с нулевым заземляющим проводом (380—127 *в*) возможны схемы присоединения «фаза—земля», «три фазы—земля» и др. Наиболее часто применяется схема «фаза—земля», при которой ПУ значительно проще и экономичнее. При необходимости обеспечить повышенную надежность следует применять схему «три фазы—земля», так как обрыв двух или трех фаз менее вероятен, чем одной.

При выборе схемы присоединения важно обеспечить минимальные потери в линии. Если, например, в линию между фазными и нулевыми проводами включены осветительные приборы, то схема присоединения должна быть «фаза—фаза» во избежание дополнительных потерь в этих приборах. При малом числе неоднородностей и большой протяженности линии также целесообразна схема «фаза—фаза», имеющая значительно меньшее километрическое затухание, чем схема «фаза—земля».

Кроме гальванического способа, возможен так называемый антенный способ присоединения, а именно присоединение при помощи проводника (антенны), подвешенного параллельно линии (см. рис. 5,*д*), при помощи катушек индуктивности и, наконец, через силовые трансформаторы (рис. 5,*е*). Последний способ встречается при организации высокочастотной связи по силовым цепям 3/0,4 *кв* на торфоразработках [Л. 10]. Здесь аппаратура связи подключается к сети 3 *кв* со стороны низковольтной обмотки силового трансформатора через разделительный конденсатор.

Как показали измерения, затухание сигналов телемеханики в трансформаторах 3/0,4; 6/0,5 и 3/0,5 *кв* мощностью 100—380 *ква* сравнительно невелико в диапазоне 10—50 *кгц* (0,2—1,0 *неп*). Для трансформаторов других типов такой метод присоединения не применяется вслед-

ствие высокого переходного затухания, часто достигающего 1—4 *неп*.

Антенный способ связи при помощи проводника, подвешенного параллельно линии, также практически не применяется вследствие больших потерь.

Схемы переходных устройств с конденсаторами связи в распределительных сетях 6/0,4 *кв* значительно проще, чем в высоковольтных линиях электропередач (ЛЭП). При относительно небольшой величине напряжения (0,2—0,6 *кв*) можно использовать конденсаторы связи большой

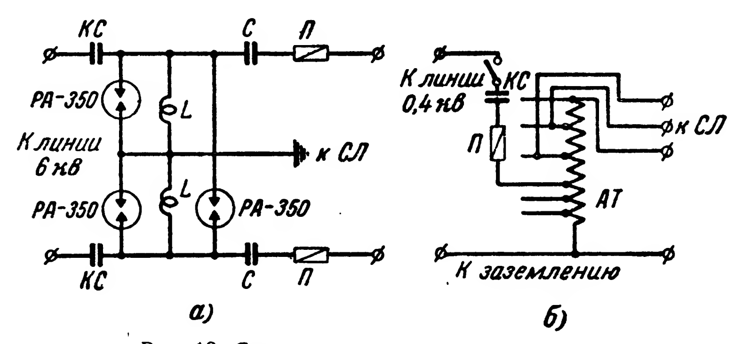


Рис. 19. Схема устройства присоединения.
а — двухфазного к сети 6 *кв*; *б* — однофазного к сети 1/0,2 *кв*.
КС — конденсатор связи; *АТ* — автотрансформатор; *П* — предохранитель;
С — дублирующий конденсатор; *РА* — грозоразрядник.

емкости — до 0,5—2,0 *мкф*. В этом случае сопротивление для токов высокой частоты мало и установки компенсационных устройств или специальных фильтров не требуется (рис. 19,*а*). Из экономических соображений емкость конденсаторов связи на линиях 6 *кв* берется несколько ниже: 0,125—0,01 *мкф*. Во избежание пробоя конденсатора связи величина его рабочего напряжения принимается равной не менее чем удвоенному напряжению силовой сети.

В качестве конденсаторов связи в сетях 1,0—0,2 *кв* используются конденсаторы типа КБГ. Они могут работать при температуре от —60 до +70° С, при относительной влажности воздуха 95—98% и выдерживают в течение 10 *сек*, не пробиваясь, испытательное напряжение постоянного тока, равное тройному рабочему напряжению.

Нижняя обкладка конденсатора связи заземляется через высокочастотный дроссель *L*, который практически полностью исключает утечку на землю токов высокой ча-

стоты и имеет очень малое сопротивление для тока с частотой 50 *гц*.

В некоторых случаях целесообразно подключение через автотрансформатор *АТ*. При этом можно произвести согласование кабельной соединительной линии (СЛ) и воздушной распределительной сети, имеющих различные волновые сопротивления (рис. 19,*б*).

Для обеспечения надежной защиты от грозовых и других перенапряжений предусматривается установка грозоразрядника и предохранителей (рис. 19,*а*). В силовых шахтных сетях установки грозоразрядника не требуется. В низковольтных сетях 1/0,2 *кв* подключение ПУ к линии осуществляется через выключатель для удобства проведения ремонтных и профилактических работ (рис. 19,*б*).

Соединительные линии (высокочастотные фидеры) выполняются одно- или двухпроводными. В зависимости от местных условий они могут быть воздушными или кабельными. Длина СЛ обычно невелика: от нескольких десятков метров до 1—2 *км*. Воздушные СЛ прокладываются по правилам строительства воздушных проводных линий связи. При прокладке СЛ по стенам, например в шахте или метрополитене, используется изолированный провод типа ПРГ сечением 1,5—2,5 *мм*^{2}, подвешиваемый на крюках.

В некоторых случаях удобнее кабельная СЛ. Для этой цели применяется кабель типа ФКБ, который в рабочем диапазоне частот имеет затухание 0,05—0,2 *неп/км* и волновое сопротивление 100 *ом*.

В ряде случаев более рациональная схема канала связи может быть обеспечена при подключении аппаратуры ТУ—ТС в определенных точках линии. Как видно из рис. 20, линию электропередачи можно искусственно, при помощи высокочастотных заградителей ВЗ, разделить на несколько самостоятельных участков. В результате прокладки соединительной линии ($СЛ_2$) в обход участков сети, вносящих большое затухание (кабельные присоединения, ответвления и пр.), можно обеспечить высокий уровень телемеханических сигналов на наиболее удаленных точках линии. При такой схеме канала связи дальность передачи сигналов ТУ—ТС может быть значительно увеличена.

К устройствам присоединения, помимо ПУ и СЛ, в низковольтных силовых сетях 1/0,2 *кв* относится также щит переключений (ЩП).

Щит переключений устанавливается непосредственно в помещении диспетчера для удобства настройки и эксплуатации системы ТУ—ТС, контроля состояния линии или аппаратуры, возможности переключения СЛ, ремонта

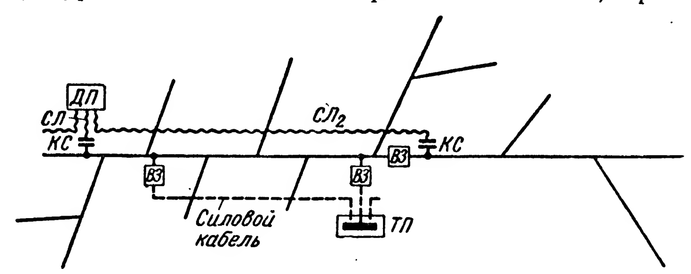


Рис. 20. Схема прокладки соединительных линий.
ДП—диспетчерский пункт; *ТП*—тяговая подстанция; *ВЗ*—высокочастотный заградитель; *СЛ*—соединительная линия; *КС*—конденсатор связи.

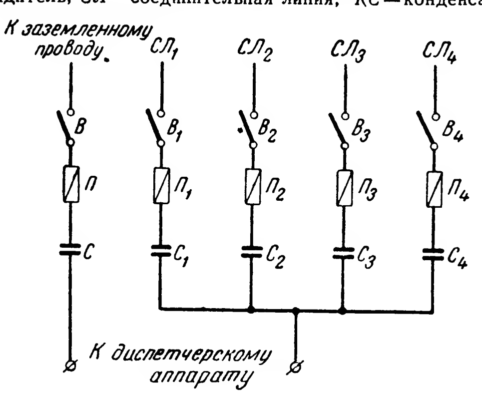


Рис. 21. Электрическая схема щита переключений.

и пр. Как видно из рис. 21, тракт передачи через ЩП проходит по цепи: выключатель *В* — предохранитель *П* — конденсатор *С*. Предохранители и конденсаторы служат элементами техники безопасности и дублируют соответствующие элементы ПУ. На исполнительных объектах установка ЩП не предусматривается.

11. ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ЗАГРАДИТЕЛИ

Высокочастотные заградители (ВЗ) предназначены для повышения входного сопротивления низкоомных подключений линии и тем самым для уменьшения токов утечки,

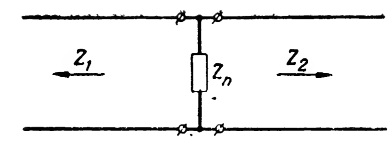


Рис. 22. Схема включения в линию простейшего четырехполюсника поперечного типа.

обусловливающих дополнительные потери в линии.

Любое подключение — электродвигатель, ответвление и т. п. — представляет собой простейший четырехполюсник поперечного типа, включенный в линию (рис. 22). Вносимое таким четырехполюсником затухание

$$b_{\text{вн}} = \ln\left|1 + \frac{1}{Z_{\text{п}}} \cdot \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}\right|, \tag{80}$$

где Z_1 и Z_2 — входные сопротивления линии в сторону передатчика и приемника в месте подключения;

$Z_{\text{п}}$ — входное сопротивление подключения.

С некоторой погрешностью примем, что $Z_1 = Z_2 = Z_{\text{с}}$; тогда

$$b_{\text{вн}} = \ln\left|1 + \frac{Z_{\text{с}}}{2Z_{\text{п}}}\right|. \tag{81}$$

Отсюда следует, что вносимое затухание зависит от отношения величины волнового сопротивления линии к входному сопротивлению подключения.

Зависимость величины вносимого затухания от отношения $Z_{\text{п}}/Z_{\text{с}}$ показана в виде кривых на рис. 23. Здесь даны два

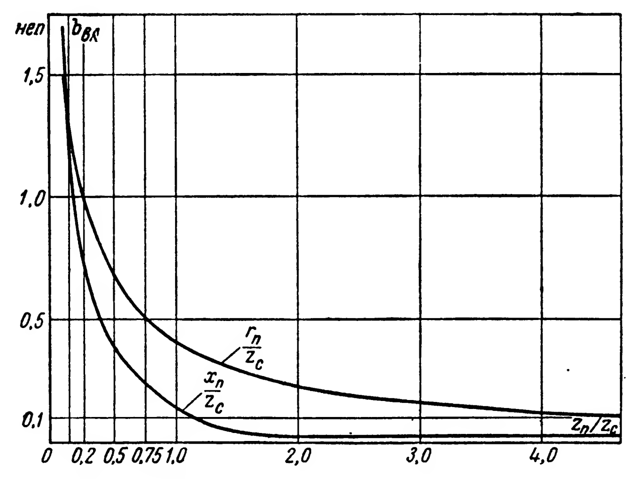


Рис. 23. Графики зависимости вносимого затухания от $Z_{\text{п}}/Z_{\text{с}}$.

крайних случая: чисто активного и реактивного $Z_п$. Волновое сопротивление линии обычно может быть принято чисто активным: $Z_с \approx R$. Сопротивление $Z_п$ — в общем случае комплексная величина:

$$Z_п = Z_{вз} + Z_э,$$

где $Z_{вз}$ — входное сопротивление высокочастотного заградителя;

$Z_э$ — входное сопротивление элемента цепи, подлежащего высокочастотной обработке.

Как видно из рис. 23, при чисто реактивной нагрузке, когда $z_п = x_п$, вносимое затухание несколько меньше, чем при чисто активной нагрузке, когда $z_п = r_п$.

Принято считать допустимым вносимое затухание, не превышающее 0,2 *неп*, что обеспечивается при выполнении неравенства

$$z_п > 2z_с.$$

На кабельных линиях, имеющих волновое сопротивление много меньшее, чем у воздушных линий, практически можно принять вносимое затухание не превышающим 0,1 *неп*. Учитывая, что волновое сопротивление кабельных линий в 10—20 раз ниже, чем воздушных линий, величина $z_п$ может быть выбрана также намного меньшей.

При большом количестве неоднородностей линии даже эти, казалось бы, небольшие величины вносимого затухания 0,1—0,2 *неп* могут в сумме составить значительную величину. Вместе с этим дальнейшее повышение входного сопротивления каждого присоединения за счет $Z_{вз}$ оказывается неэкономичным вследствие увеличения веса и габаритов высокочастотного заградителя.

Сопротивление высокочастотного заградителя определяется главным образом величиной индуктивности силовой катушки $L_с$, которая врезается в силовую цепь и рассчитана на пропускание рабочего тока. Чем больше индуктивность $L_с$, тем больше сопротивление ВЗ. При больших рабочих токах получаются часто значительный вес и габариты силовой катушки. Габариты $L_с$ растут с увеличением ее индуктивности и величины рабочего тока. Сечение намоточного провода силовой катушки определяется из расчета примерно 2 *а* на 1 *мм*^{2} медного провода.

В зависимости от частоты канала, его ширины и схемы изготавливаются силовые катушки ВЗ с индуктивностью 0,1—2 *мгн*, рассчитанные на пропускание рабочего тока

от нескольких десятков до нескольких тысяч ампер. Индуктивность силовой катушки ВЗ кабельной линии может быть значительно ниже; чаще всего встречаются ВЗ с катушками индуктивностью 0,1—0,4 *мгн.*

Высокочастотные заградители, имеющие силовые катушки с небольшой индуктивностью, собираются по одно-

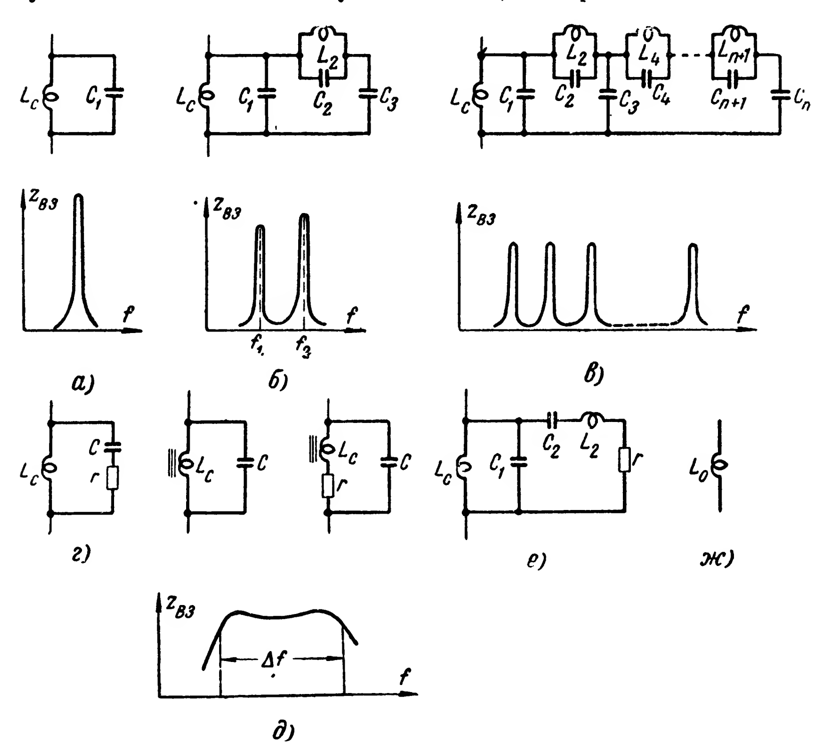


Рис. 24. Схемы высокочастотных заградителей.

а — одночастотного; *б* — двухчастотного; *в* — многочастотного; *г* — широкополосного с тупым резонансом; *д* — широкополосного со стальным сердечником; *е* — широкополосного по схеме полузвена фильтра типа *К*; *ж* — дросселя.

или многорезонансной схеме (рис. 24,*а*—*в*). Такие ВЗ могут поднять входное сопротивление в узкой полосе частот (однорезонансный ВЗ) или в нескольких отдельных полосах частот (многорезонансный ВЗ). Обычно применяются одно- и двухполосные заградители (рис. 24,*а* и *б*).

Наряду с резонансными заградителями применяются и так называемые широкополосные ВЗ (рис. 24,*г*—*е*). Широкополосные заградители в зависимости от величины

индуктивности и диапазона частот телемеханических каналов обеспечивают необходимое входное сопротивление $z_{вз}$ в широкой полосе частот. Эти заградители целесообразно применять при большом числе близко расположенных по частотам каналов связи и телемеханики.

Узкополосные резонансные заградители

1. Одночастотные заградители (рис. 24,*а*) обеспечивают работу одного канала и настраиваются на рабочую частоту при помощи конденсатора, емкость которого

$$C_1 = \frac{1}{\omega^2 L_c}. \qquad (82)$$

Например, при $f=50$ *кгц* и $L_c=0{,}2\cdot10^{-3}$ *гн* получим $C=5{,}1\cdot10^{-8}$ *ф*.

Величина индуктивности L_c берется не больше 0,1—0,2 *мгн*; используются конденсаторы настройки типа КСО. На кабельных линиях можно выбрать $L_c\approx0{,}03\div0{,}05$ *мгн*.

Необходимая величина сопротивления $z_{вз}$ этих заградителей обеспечивается, несмотря на малую индуктивность L_c, резонансными свойствами схемы, имеющей высокую добротность.

2. Из графиков изменения входного сопротивления $z_{вз}$ (рис. 24,*б* и *в*) многочастотных заградителей видно, что и эти заградители обеспечивают заграждение в узких полосах частот. Чаще применяются двухчастотные заградители, например для обработки электровозов и кабельных присоединений, идущих от тяговых подстанций, и пр. Электровозные заградители рассчитаны на ток до 100 *а*, кабельные — на 250—300 *а*.

Емкости двухрезонансного заградителя рассчитываются по формулам:

$$C_1 = \frac{1}{(2\pi f_2)^2 L_c}; \quad C_2 = \frac{1}{(2\pi f_2)^2 L_2}; \quad C_3 = \frac{f_2^2/f_1^2 - 1}{(2\pi f_2)^2 (L_c + L_2)}. \qquad (83)$$

Контуры заградителя L_cC_1 и L_2C_2 настраиваются на частоту $f_2 (f_2>f_1)$, а емкость C_3 настраивает заградитель на частоту f_1. Настройка заградителя осуществляется при помощи магазинов емкостей, которые затем заменяются конденсаторами типа КСО.

Большим преимуществом резонансных заградителей является то, что они обеспечивают требуемое $Z_{вз}$ при малой индуктивности силовой катушки. Это особенно важно там, где в сети протекают большие рабочие токи.

3. Широкополосные заградители обеспечивают запирание целого спектра частот, но имеют значительно большую индуктивность L_c. Поэтому применение широкополосных заградителей целесообразно преимущественно в сетях с небольшим рабочим током (несколько сотен ампер). Индуктивность силовых катушек широкополосных заградителей в несколько раз больше, чем у резонансных ВЗ, обычно 0,5—2 *мгн*. В то же время перекрываемый диапазон частот широкополосного заградителя может обеспечить работу нескольких каналов.

В настоящее время применяются широкополосные заградители, имеющие различные схемы (рис. 24,*г*—*е*). Как видим, схема на рис. 24,*г* идентична схеме однорезонансного заградителя, но искусственно снижена добротность резонансного контура включением последовательно с конденсатором активного сопротивления *r*.

Широкополосный заградитель, представленный на рис. 24,*е* построен по схеме полузвена полосового фильтра типа *K*.

Элементы фильтра определяются по формулам:

$$\left.\begin{aligned} L_1 &= \frac{r\Delta f}{2\pi f_1 f_2}; \quad C_1 = \frac{1}{2\pi r\Delta f};\\ L_2 &= \frac{r}{2\pi\Delta f}; \quad C_2 = \frac{\Delta f}{2\pi r f_1 f_2}, \end{aligned}\right\} \qquad (84)$$

где r — активное сопротивление ($r \geqslant 2z_c$);
$\Delta f = f_2 - f_1$ — полоса запирания заградителя.

В распределительных силовых сетях в качестве силовой катушки удобно использовать трамвайно-троллейбусные радиореакторы типа ИКЗБ; катушка намотана медной лентой 32×1,25 *мм*, имеет 50 витков и рассчитана на ток 100 *а*. Индуктивность катушки 0,8 *мгн* при собственной ёмкости 70 *пф*. В настоящее время промышленностью выпускаются катушки, имеющие две такие секции, общая индуктивность которых составляет 2,1 *мгн*.

В сельских сетях используются одноконтурные заградители с пониженной добротностью; индуктивность силовой катушки 1 *мгн*, емкость конденсатора 7 000 *пф*. Силовая катушка такого заградителя намотана медной шинкой сечением 3,8×6,9 *мм* и имеет два слоя по 85 витков каждый. Номинально допустимый ток — до 60 *а*.

Высокочастотный дроссель (рис. 24,*ж*) наиболее простой по электрической схеме тип ВЗ. Применяются дроссели в линиях с малым рабочим током (не более 10 *а*). В таких случаях можно дроссель выполнить с индуктивностью в несколько десятков миллигенри и обеспечить при небольших габаритах практически любое сопротивление.

Высокочастотные заградители со стальным сердечником (рис. 24,*д*) относятся к типу одноконтурных широкополосных ВЗ, у которых активное сопротивление включено последовательно с индуктивностью. Стальной сердечник повышает индуктивность силовой катушки, роль активного сопротивления r выполняют потери в стали. При этом ширина запираемого спектра частот тем больше, чем больше габариты силовой катушки и сердечника.

С изменением частоты величина потерь в таком заградителе меняется. Потери зависят от размеров сердечника, толщины пластин, из которых он набирается, и взаимного расположения пластин при шихтовке. С ростом потерь частота резонанса контура передвигается в нижнюю часть спектра.

Индуктивность $L_с$ с увеличением размеров сердечника растет все медленнее. Поэтому применение слишком больших сердечников нецелесообразно. Конструктивно они выполняются разомкнутыми длиной не больше длины силовой катушки. Установка сердечника в виде параллелепипеда размерами 920×170×170 *мм* из пластин 0,35 *мм* (156 *кг*) обеспечивает, например, увеличение индуктивности заградителя типа КЗ-500 с 0,124 до 0,42 *мгн*. Введение сердечника из пластин 0,5 *мм* весом 90 *кг* увеличивает индуктивность до 0,3 *мгн*. Вообще же для КЗ-500 наибольшая возможная индуктивность $L_с=0{,}52$ *мгн* *. Такие заградители могут успешно применяться и в сетях 10/0,2 *кв*.

Применение ВЗ со стальными сердечниками дает возможность значительно сократить расход меди и уменьшить габариты заградителя, правда при некотором увеличении его веса.

12. ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ПЕРЕМЫЧКИ

В тех случаях, когда силовая линия имеет разрыв или проходит через электроустройства, вносящие большое затухание (подстанции, силовые трансформаторы и т. п.),

* По данным ОРГРЭС.

необходима установка обходных устройств в виде высокочастотных перемычек (ВП) (рис. 25,*а* и *б*). Эти устройства свободно пропускают токи высокой частоты, сохраняя разрыв цепи для рабочего тока. Основным элементом

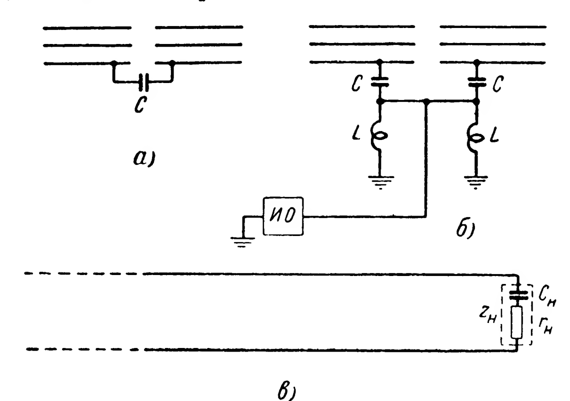


Рис. 25. Схемы включения высокочастотных перемычек и нагрузочного сопротивления.

ВП является конденсатор. Тип и все другие характеристики этих конденсаторов те же, что и у конденсаторов связи. Если в данное место одновременно необходимо подключение к сети аппаратуры ТУ—ТС, то ВП выполняется из двух конденсаторов (рис. 25,*б*).

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В РАЗВЕТВЛЕННОЙ СИЛОВОЙ СЕТИ

Любая распределительная сеть как линия связи характеризуется большим разнообразием схем конструкций отдельных элементов цепи и режимов работы. Основное отличие разветвленной силовой сети от обычных линий связи — сравнительно небольшая их протяженность, большое число различных неоднородностей, ответвлений и отсутствие согласованных нагрузок. Это определяет общую картину распределения напряжения и тока линии.

Неоднородности и ответвления силовой сети создают большие потери, которые определяются в основном утечкой токов высокой частоты через различные нагрузки и

ответвления. Чем меньше входные сопротивления неоднородностей, тем больше утечка. Кроме того, неоднородности линии вызывают отраженные волны. Особенно интенсивно происходит отражение от разомкнутых или короткозамкнутых концов линии. Вследствие этого в разветвленных силовых сетях наблюдается образование стоячих волн в результате наложения падающих и отраженных волн.

13. РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЛИНИИ

Довольно часто в необработанной разветвленной силовой сети (РСС) для токов высокой частоты возникает режим холостого хода, при котором напряжение и ток [Л. 2 и 15] вдоль однородной линии распределяются по закону

$$\dot{U}_x = \frac{\dot{U}_н}{\operatorname{ch} \gamma l} \operatorname{ch} \gamma (l - x); \quad (85)$$

$$\dot{I}_x = \frac{\dot{I}_н}{\operatorname{sh} \gamma l} \operatorname{sh} \gamma (l - x), \quad (86)$$

где U_x и I_x — напряжение и ток в любой точке линии на расстояния x от начала;

$U_н$ и $I_н$ — напряжение и ток в начале линии;

l — полная длина линии;

γ — постоянная распространения.

Из этих выражений видно, что ток и напряжение (рис. 26, кривая *I*) распределяются вдоль однородной линии волнообразно. При этом имеются «критические» точки, где их значения максимальны или минимальны. Количество максимумов и минимумов зависит от длины линии, ее электрических параметров и частоты тока.

Критические точки повторяются через отрезки длиной $\lambda/4 = v/4f$, где v — скорость распространения электромагнитной волны вдоль линии; f — частота.

В кабельных линиях чередование максимумов и минимумов происходит чаще, так как здесь скорость распространения почти в 2 раза меньше, чем на воздушных линиях. Таким образом, вдоль РСС может наблюдаться до нескольких десятков максимумов и минимумов. Как видно из рис. 26, напряжение в конце линии намного больше, чем напряжение в точке, отстоящей от конца линии на расстоянии $\lambda/4$, где оно наименьшее.

В результате потерь амплитуды падающей волны напряжения с удалением от начала линии и отраженной волны с удалением от конца линии уменьшаются; соответственно уменьшаются и значения максимумов и минимумов. С увеличением потерь в линии максимумы и минимумы менее заметны.

На магистральных участках РСС со значительным числом неоднородностей, вносящих в линию большое за-

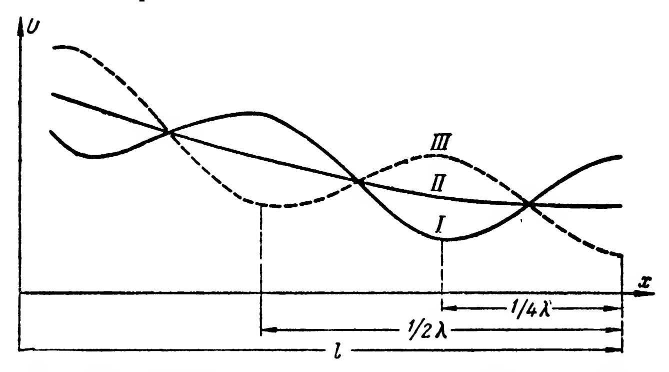


Рис. 26. Распределение напряжения при различных режимах работы линии.

I — при разомкнутом конце линии (х. х.); *II* — при согласованной нагрузке или при очень больших потерях в линии; *III* — при короткозамкнутом конце линии (к. з.).

тухание, влияние стоячих волн невелико. Концевые участки линии и ответвления, часто имеющие значительные протяженности, работают при ярко выраженном режиме стоячих волн, так как потери на концевых участках РСС определяются в основном километрическим затуханием линии. В результате напряжение в точке максимума $U_{макс}$ значительно отличается от напряжения в точке минимума $U_{мин}$.

Отношение этих величин называют коэффициентом стоячей волны:

$$k_с = \frac{U_{макс}}{U_{мин}}. \tag{87}$$

Величина, обратная $k_с$, называется коэффициентом бегущей волны:

$$k_б = \frac{1}{k_с} = \frac{U_{мин}}{U_{макс}}. \tag{88}$$

При $k_c = \infty$ наблюдается наибольшее колебание напряжения, что имеет место в линиях без потерь (см. рис. 6).

При $k_c = 1$ наблюдаются бегущие волны и колебания напряжения отсутствуют.

В разветвленной силовой сети, как и в любой линии, наибольшим получается первый коэффициент стоячей волны $k_{c1} \approx \frac{U_к}{U_1}$, величина которого может быть равна 100. Здесь $U_к$ — напряжение на конце линии; U_1 — напряжение в точке, отстоящей от конца линии на расстоянии, равном четверти длины волны ($\lambda/4$). Второй коэффициент стоячей волны $k_{c2} \approx U_2/U_3$ меньше k_{c1}, так как в линии имеются потери. Здесь U_2 — напряжение в точке, отстоящей от конца линии на расстоянии $\lambda/2$, а U_3 — на расстоянии $3\lambda/4$. Третий коэффициент стоячей волны $k_{c3} = U_4/U_5$ меньше k_{c2} и т. д.

На магистральных участках линии k_c близко к единице, поэтому здесь влияние отраженных волн почти не ощущается.

В некоторых случаях конец линии может быть короткозамкнут, например при наличии статических конденсаторов или низкоомной нагрузки. Все процессы в такой линии совершенно такие же, как в предыдущем случае. Отличие заключается только в том, что максимумы и минимумы меняются местами как для тока, так и для напряжения. Там, где был при холостом ходе максимум напряжения, при коротком замыкании образуется минимум напряжения и т. д.

Наиболее общим случаем является линия, нагруженная на произвольную нагрузку.

Если линия на конце имеет нагрузку, то часть энергии падающей волны будет ею поглощена; другая часть в виде отраженной волны пойдет к началу линии. По сравнению с режимами холостого хода и короткого замыкания максимумы и минимумы напряжения и тока в линии будут менее выражены. Амплитуда отраженной волны тем больше, чем заметнее сопротивление нагрузки отличается от волнового сопротивления линии.

При $Z_н = Z_c$ энергия падающей волны полностью поглощается сопротивлением нагрузки. В этом случае отраженные, а следовательно, и стоячие волны в линии отсутствуют. Таким образом, согласованная нагрузка в конце линии обеспечивает работу линии в режиме бегущей волны.

В реальных условиях часто сопротивление нагрузки РСС значительно отличается от волнового сопротивления линии. Как уже отмечалось, во многих случаях линия РСС находится в режиме холостого хода.

14. РЕЖИМ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ, УСЛОВИЯ ЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

Наиболее благоприятным условием работы любой линии с точки зрения передачи сигналов телемеханики является отсутствие стоячих волн или слабое их проявление, т. е. условия, близкие к режиму бегущей волны. Возникновение стоячих волн в РСС приводит к снижению устойчивости работы каналов, увеличению затухания линии и колебанию в широких пределах ее входного сопротивления. Появление стоячих волн может быть уменьшено двумя путями: согласованием нагрузки в конце линии или увеличением потерь в линии. Условия, при которых распределительная силовая сеть или отдельный ее участок могут работать в режиме бегущей волны, представляют определенный интерес.

Отсутствие отраженных волн в ненагруженных линиях определяется соотношением [Л. 9 и 12]

$$\frac{\beta}{\alpha} \geqslant 1, \qquad (89)$$

где β — километрическое затухание линии;

α — коэффициент фазы.

Коэффициенты β и α зависят от параметров линии. При отсутствии дополнительных потерь в любой РСС обязательно возникают стоячие волны, так как для воздушных и кабельных РСС $\beta/\alpha \approx 0{,}2 \div 0{,}01$.

При этом коэффициент бегущей волны может быть определен через параметры линии по формуле

$$k_б = \frac{U_{мин}}{U_{макс}} = \sin\left(\frac{\beta}{\alpha} \cdot \frac{\pi}{2}\right). \qquad (90)$$

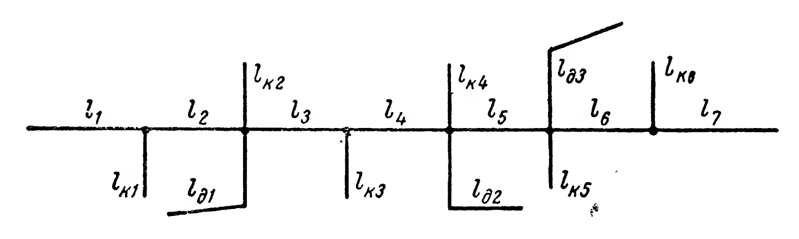
При отсутствии дополнительных потерь за счет различных неоднородностей линии справедливо более простое равенство:

$$k_б \approx \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\beta}{\alpha}. \qquad (91)$$

При включении в линию каких-либо нагрузок — трансформаторов, электродвигателей и т. п. — потери возра-

стают за счет токов утечки, а следовательно, стоячие волны в линии становятся менее заметными.

Любую РСС или ее участок с одним присоединением можно представить как двухпроводную линию с включенным в нее простейшим четырехполюсником поперечного типа (см. рис. 22). Линию со многими ответвлениями можно представить в виде соединения четырехполюсников



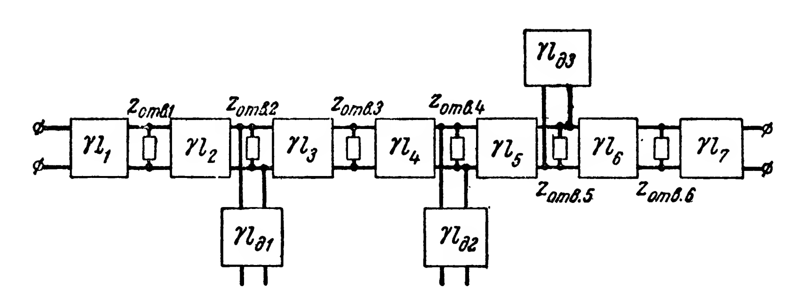


Рис. 27. Эквивалентная схема разветвленной силовой сети.

(рис. 27). Короткие ответвления $l_к$ на этом рисунке заменены сосредоточенными нагрузками $Z_{отв}$, т. е. простейшими четырехполюсниками поперечного типа, длинные $l_д$ — четырехполюсниками с постоянной передачи $g_{отв} = \gamma l_д$.

При значительном числе равномерно рассредоточенных вдоль линии включений, имеющих по сравнению с z_c большое сопротивление, приближенно такую линию можно рассматривать как некоторую линию с повышенной утечкой и новыми вторичными параметрами.

Предположим, что на расчетном участке РСС длиной 1 *км* имеется m произвольных присоединений в виде ответвлений, трансформаторов, электродвигателей и т. п. Допустим также, что проводимость присоединений $Y_п$ произ-

вольна. Тогда эквивалентная постоянная распространения

$$\gamma_э=\sqrt{(R+j\omega L)\left(G+j\omega C+\sum_1^m Y_п\right)}. \qquad (92)$$

Сгруппируем члены подкоренного выражения следующим образом:

$$\gamma_э=\sqrt{(R+j\omega L)(G+j\omega C)+(R+j\omega L)\sum_1^m Y_п}$$

и выделим постоянную распространения однородной линии без подключений. Тогда получим:

$$\gamma_э=\gamma\sqrt{1+\frac{\sum_1^m Y_п}{G+j\omega C}}=(\beta+j\alpha)K, \qquad (93)$$

где

$$K=\sqrt{1+\frac{\sum_1^m Y_п}{G+j\omega C}}\approx\sqrt{1+\frac{\sum_1^m Y_п}{j\omega C}} \qquad (94)$$

— коэффициент неоднородности.

Аналогичным образом получим выражение для волнового сопротивления неоднородной линии:

$$Z_{сэ}=\sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C+\sum_1^m Y_п}}=Z_с\frac{1}{K}. \qquad (95)$$

Точность полученных выражений параметров неоднородной линии тем выше, чем ближе распределение нагрузок линии к равномерному и чем выше их входное сопротивление. Если число нагрузок невелико и все они концентрируются в каком-либо одном месте, погрешность возрастает. Для ориентировочных расчетов в большинстве случаев приведенные выражения вполне приемлемы.

Из анализа выражения (95) достаточно ясно определяется зависимость волновых свойств линии от величины ее потерь. Величина волнового сопротивления у неоднород-

ной линии меньше, чем у однородной, и практически имеет индуктивный характер.

Коэффициент неоднородности — в общем случае комплексное число Для однородной линии $K=1$. При наличии в линии неоднородности модуль коэффициента неоднородности обычно больше единицы.

Таким образом, при введении в линию неоднородностей километрическое затухание резко возрастает, километрический угол сдвига фаз также возрастает, но незначительно. В итоге коэффициент стоячих волн уменьшается. В некоторых случаях k_c становится соизмеримым с единицей, т. е. линия работает практически в режиме бегущей волны.

Искусственное увеличение потерь линии для устранения стоячих волн невыгодно, так как при этом увеличивается затухание сигналов телемеханики. Целесообразнее режим бегущей волны для линий, имеющих малые потери, получить путем подбора согласованной нагрузки $Z_н \approx Z_c$.

В качестве нагрузки линии может быть использована цепочка последовательно соединенных конденсаторов и активного сопротивления (см. рис. 25,*в*). Применение в схеме нагрузки конденсаторов необходимо для исключения замыкания силовой цепи. Как и волновое сопротивление линии, полное сопротивление нагрузки должно иметь явно выраженный активный характер, поэтому ориентировочно можно считать

$$\frac{x_н}{r_н} = \frac{1}{\omega C_н r_н} = \frac{1}{20}, \qquad (96)$$

т. е.

$$r_н \approx z_н.$$

Сопротивление нагрузки должно быть несколько меньше волнового сопротивления линии z_c, так как имеющиеся в линии подключения несколько снижают входное сопротивление линии со стороны зажимов нагрузки. Емкость конденсатора $C_н \approx 0{,}2$ *мкф*. Желательно, чтобы в конструкции согласовывающего сопротивления предусматривалась возможность подстройки $Z_н$. Наиболее удобно регулировать сопротивление нагрузки изменением $r_н$.

Установка согласованных нагрузок $Z_н$ необходима по всем направлениям РСС, включаемым в систему телемеханизации. Участки, имеющие большие потери, и концевые, у которых $k_c \approx 1$, не требуют согласованной нагрузки.

15. ВХОДНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ОТВЕТВЛЕНИЙ

Любое ответвление вносит в линию дополнительные потери. Величина их определяется входным сопротивлением данного ответвления $Z_{отв}$. Чем меньше $Z_{отв}$, тем больше ток утечки.

В эквивалентной расчетной цепи любое ответвление может быть представлено и в виде сосредоточенного сопротивления, равного входному сопротивлению ответвления. Величина входного сопротивления ответвления зависит от параметров и длины ответвления и наличия на нем каких-либо нагрузок. При этом с изменением величины и места подключения нагрузок $Z_{отв}$ также изменяется.

В технике проводных линий связи наиболее общим случаем является работа линии и ее ответвлений с нагруженными концами. При этом обязательно добиваются согласования нагрузок, чтобы исключить возможность образования отраженных волн. Входное сопротивление таких ответвлений всегда равно их волновому сопротивлению.

В нашем случае входное сопротивление ответвления может быть любым. В зависимости от сопротивления нагрузки входное сопротивление ответвления меняется в пределах:

$$Z_{отв} = Z_с \operatorname{th} \gamma l_{отв} \quad \text{при } Z_н = 0;$$

$$Z_{отв} = Z_с \quad \text{при } Z_н = Z_с;$$

$$Z_{отв} = Z_с \operatorname{cth} \gamma l_{отв} \quad \text{при } Z_н = \infty. \tag{97}$$

Здесь предполагается, что параметры $Z_с$ и γ ответвления такие же, как у основной линии.

При произвольной нагрузке на конце линии

$$Z_{отв} = Z_с \frac{Z_н + Z_с \operatorname{th} \gamma l_{отв}}{Z_с + Z_н \operatorname{th} \gamma l_{отв}}. \tag{98}$$

Часто на конце ответвлений нагрузка отсутствует. В таких случаях $Z_{отв}$ в зависимости от частоты тока и длины ответвления изменяется согласно выражению (97). Как видно из рис. 28, входное сопротивление ответвления может быть больше и меньше волнового сопротивления. Заметное влияние на величину $Z_{отв}$ оказывает соотношение длины ответвления и длины волны.

Входное сопротивление значительно выше для тех ответвлений, у которых $l_{отв} \approx \lambda/2$; λ и т. д. И, наоборот, $z_{отв}$

намного меньше z_c у ответвлений, длина которых соизмерима с λ/4, 3λ/4, 5λ/4 и т. д.

Наибольший размах колебаний наблюдается в конце ответвления. С увеличением расстояния от конца ответвления разница между z_c и $z_{отв}$ уменьшается, так как увеличивается затухание отраженных волн и ослабляется их влияние.

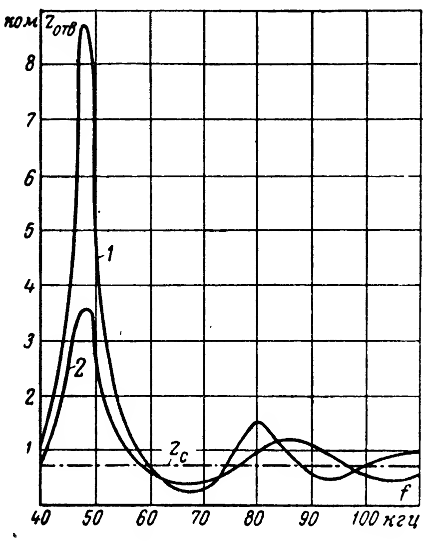


Рис. 28. Зависимость входного сопротивления ненагруженного ответвления линии 6 *кв* со стальными проводами ПС-25 от длины ответвления и частоты тока.

1 — для схемы фаза—фаза, $l_{отв} = 3$ *км*; 2 — для схемы фаза — земля, $l_{отв} = 10$ *км*.

Ответвления, у которых затухание превышает 1,5 *неп* имеют входное сопротивление, соизмеримое с волновым сопротивлением.

В зависимости от длины ответвления изменяется не только модуль, но и аргумент входного сопротивления ответвления. Входное сопротивление ответвления, длина которого не превышает λ/4, имеет отрицательный аргумент. В этом случае ответвление практически эквивалентно емкостной нагрузке определенной величины. Для ответвлений длиной $\lambda/4 < l_{отв} < \lambda/2$ получается положительный аргумент и т. д.

Входное сопротивление ответвления для общего случая может быть определено с достаточной точностью по приближенной формуле

$$Z_{отв} = \frac{1}{Y_н} + \frac{2\nu^2}{1+\nu} Z_л l_{отв}, \qquad (99)$$

где $Y_н$ — проводимость утечки за счет каких-либо нагрузок;

$Z_л = R + j\omega L$ — полное сопротивление ответвления на единицу длины;

ν — коэффициент распределения нагрузки[1].

[1] Определение коэффициента распределения нагрузки дано в следующей главе.

Расчет входного сопротивления короткого ненагруженного ответвления может быть значительно упрощен. При $\operatorname{th} \gamma l_{\text{отв}} \approx \approx \gamma l_{\text{отв}}$ из выражения (97) имеем:

$$Z_{\text{отв}} \approx \frac{Z_{\text{c}}}{\gamma l_{\text{отв}}} = \frac{1}{Y_{\text{л}} l_{\text{отв}}} = \frac{1}{(G + j\omega C)\, l_{\text{отв}}}.$$

Кроме того, в рассматриваемом диапазоне частот, как правило, $G \ll \omega C$ и

$$Z_{\text{отв}} = \frac{1}{j\omega C l_{\text{отв}}}. \tag{100}$$

Таким образом, входное сопротивление коротких ответвлений (рис. 29) — чисто емкостное. Расчет $Z_{\text{отв}}$ по упрощенной формуле можно производить для всех ответвлений, длина которых $l_{\text{отв}} \quad \lambda/8$.

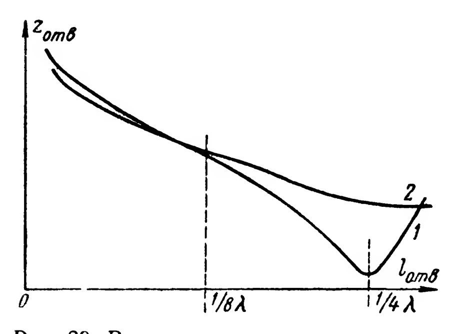


Рис. 29. Входное сопротивление короткого ответвления.

1 — рассчитанное по точной формуле; *2* — рассчитанное по упрощенной формуле.

Расчет сложных ответвлений небольшой длины производится аналогичным образом. В таких случаях длиной ответвления $l_{\text{отв}}$ с достаточной точностью можно считать сумму $l_1 + l_2 + l_3 + \ldots$ длин составляющих ее участков (рис. 30,*а*). Ответвления замкнутые, «закольцованные» (рис. 30,*б*), имеющие небольшую протяженность, в расчетах также могут учитываться в виде сосредоточенной емкости, подсчитанной по формуле (100).

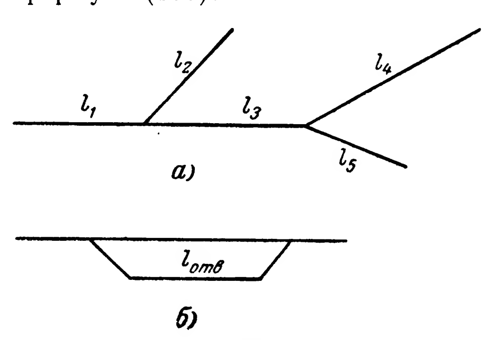


Рис. 30. Схемы сложных ответвлений.

При наличии в линии короткой кабельной вставки или присоединения и ее можно заменить эквивалентной емкостью

$$C = C_к l_к, \qquad (101)$$

где $l_к$ — длина кабеля;

$C_к$ — километрическая емкость кабеля.

ГЛАВА ПЯТАЯ

РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЦЕПЕЙ

Расчет высокочастотных каналов связи по РСС представляет определенные трудности. Первоочередной задачей при расчете канала по любой разветвленной силовой сети является определение рабочего затухания линии.

В настоящее время, как известно из теории электросвязи, расчет проводных линий связи осуществляется графоаналитическим методом по номограммам. Этот метод основан на разделении линии на однородные участки, которые могут быть представлены в виде четырехполюсников, включенных чаще всего цепочкой, а также параллельно или последовательно. Во всех случаях расчет ведется последовательно для каждого четырехполюсника, начиная с конца линии. Предварительно определяется входное сопротивление каждого четырехполюсника. В случае соединения цепочкой входное сопротивление $Z_{вх}$ предпоследнего участка рассчитывается с нагрузкой в виде сопротивления последнего участка. Это сопротивление $Z_{вх}$ будет нагрузкой предыдущего участка и т. д. Затем по известным параметрам и нагрузкам каждого четырехполюсника определяются их вносимые затухания и рабочее затухание всей системы. Результаты расчета дают полное представление об элементах линии и ее электрических свойствах в целом. Точность расчета теоретически может быть любой. Но большим недостатком графоаналитического метода являются его трудоемкость и громоздкость. Объем вычислений возрастает с увеличением числа четырехполюсников цепи (их может быть несколько десятков). Громоздкость вычислений приводит в ряде случаев к накапливанию погрешности, причем и номограммы не дают значительного упрощения расчета. Поэтому применение этого метода к расчету разветвленных силовых сетей мало приемлемо.

Получить достаточно точный инженерный метод расчета таких сетей можно, вводя некоторые допущения. Ниже для расчета различных типов РСС предлагаются два приближенных аналитических метода: метод оценки элементов рабочего затухания линии и метод моментов.

Первый метод применяется в расчетах высокочастотных каналов по линиям электропередачи. Он полезен также при расчете высокочастотных каналов по РСС, имеющих большие протяженности при относительно небольшой неоднородности. К таким РСС можно отнести сельские сети 35—6 *кв* и т. п.

Метод моментов разработан для линий проводного вещания. Наиболее целесообразно использование этого метода при расчете каналов связи по коротким сильно разветвленным и неоднородным цепям, например силовым сетям освещения, контактным сетям электровозной откатки рудных шахт и др.

16. РАСЧЕТ МЕТОДОМ ОЦЕНКИ ЭЛЕМЕНТОВ РАБОЧЕГО ЗАТУХАНИЯ ЛИНИИ

В основу этого метода положено допущение, что при достаточно большой рассредоточенности нагрузок в линии (при небольшом их количестве) влиянием каждого присоединения цепи на величину входного сопротивления в точках присоединения других нагрузок можно пренебречь. В таком случае при согласованном включении передатчика и приемника можно принять, что входное сопротивление линии в направлениях от места включения любой нагрузки равно Z_c. Влияние нагрузок друг на друга невелико при их удалении на расстояние $\geqslant \lambda/8$. Оно тем слабее, чем выше $Z_{вх}$ присоединений линии.

Базируясь на этих рассуждениях, довольно просто удается оценить величину вносимого затухания для всех основных типов неоднородностей РСС: ответвлений, трансформаторов и т. п.

Рабочее затухание всей линии определяется в результате суммирования затуханий, вносимых всеми неоднородностями, а также затухания самой линии и соединительных проводов.

В самом деле, любая распределительная силовая сеть может быть представлена в виде цепочечного соединения четырехполюсников. При одинаковом внутреннем сопротивлении аппаратуры на обоих концах линии рабочее

затухание такой составной цепи равно сумме затуханий, вносимых каждым четырехполюсником:

$$b_p = b_{вн1} + b_{вн2} + \ldots \tag{102}$$

Большинство неоднородностей РСС, включая ответвления, могут быть представлены в виде неполных четырехполюсников поперечного типа, включенных в линию (см. рис. 22). Вносимое затухание любого такого четырехполюсника, включенного в РСС:

$$b_{вн} = \ln \left| 1 + \frac{1}{Z_п} \cdot \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} \right|, \tag{103}$$

где $Z_п$ — входное сопротивление включенного в линию неполного четырехполюсника (присоединения);

Z_1 — входное сопротивление линии в сторону передатчика;

Z_2 — входное сопротивление линии в направлении передачи.

Определим выражения $b_{вн}$ для основных наиболее распространенных типов неоднородностей.

а) Затухание, вносимое ответвлениями, $b_{отв}$

Затухание за счет ответвлений зависит от числа и длины ответвлений, имеющихся на конце ответвлений нагрузок, и места присоединения ответвлений. Рассмотрим наиболее характерные случаи.

1. При разомкнутом конце ответвления и согласованном включении аппаратуры на обоих концах линии (или когда можно не считаться с отраженными волнами)

$$Z_1 = Z_2 = Z_c; \quad Z_п = Z_{отв} = Z_c \operatorname{cth} \gamma l_{отв}. \tag{104}$$

Подставив эти выражения в формулу (103), получим:

$$b_{отв} = \ln \left| 1 + \frac{1}{2} \operatorname{th} \gamma l_{отв} \right|. \tag{105}$$

2. При наличии согласованной нагрузки на концах линии и на конце рассматриваемого ответвления ($Z_1 = Z_2 = Z_п = Z_c$)

$$b_{отв} = \ln 1{,}5 \approx 0{,}4 \textit{ неп.} \tag{106}$$

3. При согласованной нагрузке на концах линии и произвольной нагрузке $Z_н$ на конце ответвления по формуле (98) имеем:

$$Z_п = Z_с \frac{Z_н + Z_с \operatorname{th} \gamma l_{отв}}{Z_с + Z_н \operatorname{th} \gamma l_{отв}} \qquad (107)$$

и

$$b_{отв} = \ln \left| 1 + \frac{Z_с + Z_н \operatorname{th} \gamma l_{отв}}{2(Z_н + Z_с \operatorname{th} \gamma l_{отв})} \right|. \qquad (108)$$

Как можно видеть из анализа этих выражений, наибольшее затухание вносят ненагруженные ответвления, длина которых соизмерима с $\lambda/4$, $3\lambda/4$ и т. д. И, наоборот, ненагруженные ответвления длиной $\lambda/2$, λ, $3\lambda/2$ и т. д. вносят минимальное затухание. Это объясняется тем, что в первом случае ответвления имеют очень малое входное сопротивление $Z_п$ и происходит сильное шунтирование линии; во втором случае, наоборот, $Z_п$ ответвлений велико.

б) Затухание, вносимое кабельными вставками и присоединениями, $b_к$

Это затухание образуется в результате несогласованности волновых сопротивлений кабельной и воздушной цепей и за счет большого километрического затухания кабеля. Так как длина кабелей обычно невелика (от нескольких десятков до нескольких сотен метров), с достаточной для практики точностью кабель можно рассматривать как сосредоточенную емкость:

$$C = C_к l_к, \qquad (109)$$

где $C_к$ — километрическая емкость кабеля;

$l_к$ — длина кабеля.

Величина $b_к$ может быть рассчитана по формуле (103). При наличии согласованной нагрузки на концах линии

$$Z_1 = Z_2 = Z_с, \text{ считая } Z_п = -j \frac{1}{\omega C} \qquad (110)$$

имеем:

$$b_к = \ln \left| 1 + j \frac{Z_с \omega C}{2} \right|. \qquad (111)$$

в) Затухание, вносимое сосредоточенными неоднородностями, $b_н$

К таким неоднородностям относятся: электродвигатели, трансформаторы, установки, имеющие параллельное или последовательное соединение нескольких электродвигателей (электровозы, экскаваторы, комбайны и т. п.). Входное сопротивление этих неоднородностей в общем случае комплексное, и, как было показано в гл. 2, величина модуля сопротивления зависит от мощности электродвигателя или трансформатора, их конструкции, от схемы присоединения и частоты тока. В большинстве случаев это сопротивление носит емкостный характер. Сопротивление низкоомных обработанных нагрузок определяется входным сопротивлением заградителя и может считаться чисто активным:

$$Z_п \approx Z_{вз}. \qquad (112)$$

Расчет $b_н$ в данном случае также производится по формуле (103).

При согласованных нагрузках на концах линии $(Z_1 = Z_2 = Z_с)$

$$b_н = \ln\left|1 + \frac{Z_с}{2Z_п}\right|, \qquad (113)$$

Общее рабочее затухание канала связи

Рабочее затухание расчетного участка цепи при $Z_1 = Z_2 = Z_с$ определяется как сумма вышеперечисленных составляющих затухания:

$$b_р = \beta l + \beta_с l_с + \Sigma b_{отв} + \Sigma b_к + \Sigma b_н + b_{доп}, \qquad (114)$$

где β — километрическое затухание линии;

l — длина расчетного участка;

$\beta_с$ — километрическое затухание соединительной линии;

$l_с$ — длина соединительной линии;

$b_{отв}$ — затухание, вносимое в линию ответвлением;

$b_к$ — затухание, вносимое в линию кабельной вставкой;

$b_н$ — затухание, вносимое в линию сосредоточенной неоднородностью (силовым трансформатором, электродвигателем и т. п.);

$b_{доп}$ — дополнительное затухание за счет устройств присоединения, обходных устройств и концевого затухания.

Рабочее затухание определяется по формуле (114) в нормальных условиях эксплуатации РСС. При аварийных режимах — коротком замыкании, обрыве или заземлении одного из проводов линии — величина $b_р$ может резко возрасти, так что в некоторых случаях полностью прервется связь. Большое увеличение затухания наблюдается также при появлении на проводах РСС инея или гололеда. Затухание растет с увеличением толщины гололеда и частоты тока [Л. 19 и 25]. При частоте порядка 100 *кгц* и толщине льда 1 *см* километрическое затухание линии увеличивается почти в 2 раза. При толщине льда около 10 *см* затухание увеличивается в 10—20 раз. Но явления гололеда происходят редко.

Для обеспечения надежности работы высокочастотных каналов по РСС на случай проявления одного из аварийных режимов необходимо предусмотреть запас по перекрываемому затуханию в пределах 1 *неп*.

17. МЕТОД МОМЕНТОВ

При расчете малопротяженных, но сильно разветвленных и неоднородных РСС индивидуальная оценка затуханий элементов цепи затруднена и может привести к большим погрешностям. В этом случае вследствие большого числа неоднородностей линии и малого расстояния между ними неоднородности сильно влияют друг на друга. Влияние проявляется в том, что входное сопротивление линии в различных точках неодинаково и меняется в широких пределах. Поэтому РСС такого типа желательно рассматривать в совокупности ее элементов.

Большой интерес с этой точки зрения представляют приближенные методы расчета, применяющиеся для городских и сельских линий проводного вещания [Л. 9].

Если считать, что протяженность ответвлений и участков линии, находящихся между ними и другими подключениями линии, невелика, то в расчетах для определенного диапазона частот можно заменить гиперболические функции одним или двумя первыми членами их рядов, что значительно упрощает вычисления. Учитывая это, рабочее затухание любой такой линии (рис. 31,*б*) можно определить по формуле

$$b_р = \ln \left| 1 + Z_л \sum_{q=1}^{m} Y_q l_q \right|, \qquad (115)$$

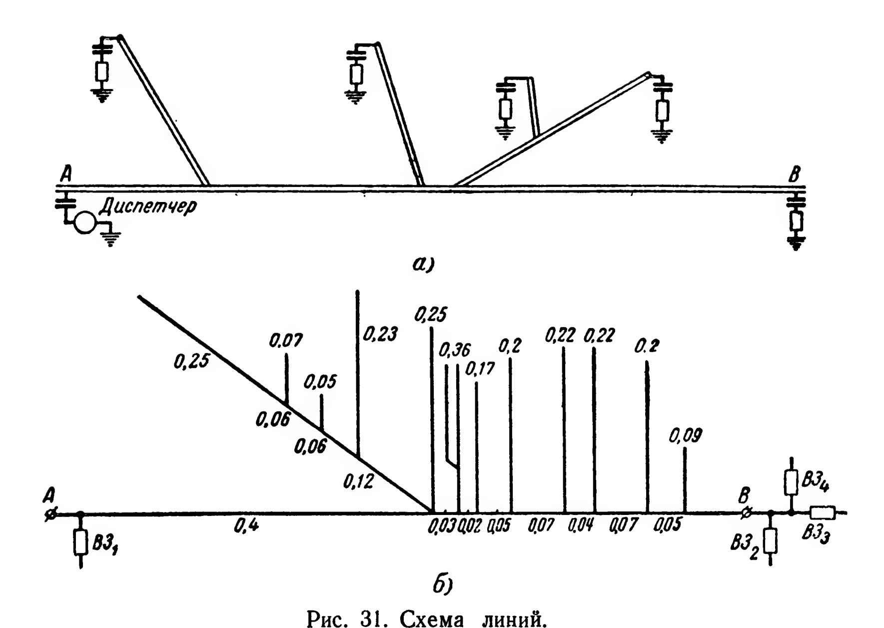


Рис. 31. Схема линий.
а—малоразветвленной, но сильно протяженной; *б*—малопротяженной, но сильно разветвленной линии.

где $Z_л$ — полное километрическое сопротивление линии:

$$Z_л = R + j\omega L; \qquad (116)$$

l_q — расстояние от расчетной точки линии до q-й нагрузки;
m — число нагрузок РСС;
Y_q — проводимость утечки через q-ю нагрузку линии.

Выражение (115) в расчетах линий проводного радиовещания получило название формулы моментов проводимостей, по аналогии выражения $\sum_{q=1}^{m} Y_q l_q$ с выражением статического момента первого порядка $M_c = F(OA)$, которое представляет собой произведение силы F на длину плеча OA (относительно некоторой точки O).

Таким образом вводится понятие момента проводимости электрической цепи $M = \sum_{q=1}^{m} Y_q l_q$ и доказывается теорема о сумме моментов, которая гласит, что момент проводимости линии длиной l равен сумме моментов проводимости отдель-

ных ее участков. Далее вводится понятие коэффициента распределения нагрузки линии ν.

Выражая момент проводимости эквивалентной линии $l_э$, имеющей сосредоточенную нагрузку с проводимостью Y на конце, можно записать:

$$\sum_{q=1}^{m} Y_q l_q = \nu l Y = l_э Y, \qquad (117)$$

откуда

$$\nu = \frac{l_э}{l}. \qquad (118)$$

Коэффициент распределения нагрузки можно определить и исходя из представления эквивалентной линии длиной l с включенной на ее конце эквивалентной проводимостью $Y_э$:

$$\sum_{q=1}^{m} Y_q l_q = \nu l Y = l Y_э; \qquad (119)$$

в этом случае

$$\nu = \frac{Y_э}{Y}. \qquad (120)$$

Коэффициент ν показывает основную тенденцию в распределении нагрузки вдоль линии. Коэффициент распределения уменьшается при концентрации нагрузки в начале линии и, наоборот, увеличивается с ее перемещением к концу линии.

Рассматривая различные случаи распределения нагрузки РСС, приведем наиболее характерные из них с соответствующими значениями ν.

1. Если нагрузка распределена равномерно вдоль линии, то $\nu = 1/2$.

2. Если неоднородности включены через равные отрезки линии, но к концу плотность нагрузки возрастает по линейному закону, то $\nu = 2/3$.

3. Если при таком же включении плотность возрастает к началу линии, то $\nu = 1/3$.

4. Если нагрузка сосредоточена в конце или начале линии, то ν принимает соответственно значение 1 или 0.

Введя коэффициент распределения нагрузки линии в выражение для затухания (115), получим:

$$b_р = \ln|1 + \nu l Y Z_л|. \qquad (121)$$

Для удобства расчета проводимость Y и коэффициент распределения ν целесообразно рассматривать в виде их составляющих: активной, индуктивной, емкостной с добавлением произведения $\nu_л Y_л$ самой линии:

$$\nu Y = \nu_а Y_а + \nu_L Y_L + \nu_C Y_C + \nu_л Y_л. \qquad (122)$$

Практически метод моментов может применяться только при расчете РСС, имеющих участки линии незначительной протяженности. Таким методом удобно рассчитывать высокочастотные каналы, работающие, например, по контактным сетям подземного транспорта железорудных шахт. На этих линиях протяженность ответвлений и расстояния между ними, как правило, не превышают 0,2—0,3 *км* (все ответвления эквивалентны емкостям). Расчетная формула затухания такой линии имеет вид:

$$b_р = \ln \left| 1 + Z_л l \left[\nu_а n Y_а + j\omega C \left(\nu_C \sum_{q=1}^{m} l_q + \nu_л l \right) \right] \right|, \qquad (123)$$

где $\nu_а$, ν_C, $\nu_л$ — коэффициенты распределения активной нагрузки, емкостной нагрузки и собственно линии;

n — количество обработанных при помощи ВЗ нагрузок линии;

m — количество ответвлений;

$Y_а$ — проводимость активной нагрузки;

C — километрическая емкость линии и ответвлений;

l_q — длина q-го ответвления;

$Z_л$ — полное километрическое сопротивление линии;

l — общая длина линии.

В приведенном выражении коэффициенты распределения

$$\nu_а = \frac{\sum_{x=1}^{m} l_x}{nl}; \quad \nu_C = \frac{\sum_{q=x=1}^{m} l_q l_x}{l \sum_{q=1}^{m} l_q}; \quad \nu_л = \frac{1}{2}. \qquad (124)$$

Здесь l_x — расстояние от начала рассматриваемой линии до соответствующей нагрузки.

Пример 1. Определим затухание канала на частотах $f = 112$ *кгц* и $f = 82$ *кгц* между наиболее удаленными точками AB линии (контактная сеть шахты 0,26 *кв* на рис. 31,*б*). На линии работает 10 электровозов, оборудованных заградителями $Z_{\text{вз}} = 500$ *ом* (на рисунке на показаны). Четыре таких же заградителя установлены в сети на кабельных присоединениях. Размеры и конструкция линии типовые.

Расчет рабочего затухания производим по формуле (123). Найдем составляющие общего затухания.

Для упрощения расчета примем распределение активной нагрузки в линии равномерным ($\nu_{\text{а}} = 0,5$).

Тогда

$$\nu_{\text{а}} n Y_{\text{а}} = 0,5\cdot 14\cdot \frac{1}{500} = 1,4\cdot 10^{-2}.$$

Для определения ν_C найдем эквивалентную длину сложных ответвлений, исходя из размеров линии:

$$l_{\text{э}} = 0,07 + 0,25 + 0,06 + 0,05 + 0,06 + 0,12 + 0,23 = 0,85 \text{ км}.$$

Пользуясь выражением (124), найдем:

$$\nu_C = \frac{0,4\cdot 0,85 + 0,4\cdot 0,25 + 0,43\cdot 0,36 + 0,45\cdot 0,17 + 0,5\cdot 0,2 +}{0,8\,(0,85 + 0,25 + 0,36 + 0,17 +} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{+ 0,57\cdot 0,22 + 0,61\cdot 0,22 + 0,68\cdot 0,2 + 0,73\cdot 0,09}{+ 0,2 + 0,22 + 0,22 + 0,2 + 0,09)} = \frac{1,233}{0,8\cdot 2,56} = 0,6.$$

По формуле (69) определим километрическую емкость линии:

$$C = \frac{55,6\cdot 10^{-9}}{\ln\frac{2h}{a_{\text{т}}}} + C_{\text{из}} = \frac{55,6\cdot 10^{-9}}{\ln\frac{2\cdot 30}{0,5}} + 200\cdot 0,3\cdot 10^{-10} = 1,76\cdot 10^{-8} \text{ ф/км}.$$

Отсюда можно установить, что

$$\omega C\left(\nu_C \sum_{q=1}^{m} l_q + 0,5l\right) = 1,23\cdot 10^{-2}(0,6\cdot 2,56 + 0,5\cdot 0,8) = 2,37\cdot 10^{-2};$$

по кривым на рис. 11 и 12 найдем:

$$Z_{\text{л}} = R + j\omega L \approx 30 + j6,28\cdot 1,12\cdot 10^{5}\cdot 1,2\cdot 10^{-3} = 30 + j845 = 845e^{j88^\circ}.$$

Подставив найденные значения в (123), найдем:

$$b_{\text{р}} = \ln\left|1 + 845e^{j88^\circ}\cdot 0,8\,(1,4\cdot 10^{-2} + j\cdot 2,37\cdot 10^{-2})\right| =$$
$$= \ln\left|1 + 18,6e^{j147^\circ 30}\right| = 2,92 \text{ неп}.$$

Аналогичным образом определим затухание при частоте 82 *кгц*:

$$b_{\text{р}} = 2,4 \text{ неп}.$$

Для организации канала связи воспользуемся аппаратурой „Сибирь-59", которая имеет максимально перекрываемое затухание 5 *неп*. Как видно из результатов расчета, нормальная работа каналов будет обеспечена даже с учетом дополнительного затухания 1 *неп* на случай аварийного режима.

Пример 2. Найдем максимальное рабочее затухание канала на частоте $f = 50$ *кгц* между пунктами A и B линии длиной 5,25 *км* (рис. 31,*а*) (контактная сеть шахты). На линии работает 20 обработанных электровозов $Z_{ВЗ} = 500$ *ом* (на рисунке не показаны). Размеры и конструкции линии — типовые.

На концах ответвлений установлены согласовывающие сопротивления, так как длина кажного ответвления превышает $\lambda/8$.

Таким образом, можно принять, что электровозы и ответвления имеют чисто активные входные сопротивления, соответственно равные 500 и 100 *ом* (линия двухцепная).

Величину рабочего затухания определим по формуле (114):

$$b_р = \beta l + n_{эл} b_{эл} + n_{отв} b_{отв} + b_{доп}.$$

По кривым, приведенным на рис. 23, определим величину затухания, вносимого электровозом и ответвлением:

1) при $\frac{z_{эл}}{z_с} = \frac{500}{100} = 5 \qquad b_{эл} = 0,1$ *неп*;

2) при $\frac{z_{отв}}{z_с} = 1 \qquad b_{отв} = 0,4$ *неп*.

Километрическое затухание найдем по кривым на рис. 14:

$$\beta \approx 0,1 \text{ неп/км}.$$

Далее, подставив известные данные, получим:

$$b_р' = 0,1 \cdot 5,25 + 20 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,4 + 1,0 \approx 5,12 \text{ неп}.$$

Для сравнения произведем расчет $b_р$ по формуле (123), которая вследствие отсутствия реактивной проводимости за счет коротких ответвлений примет вид:

$$b_р = \ln \left| 1 + Z_л l \left(\nu_а n Y_а + j \frac{1}{2} \omega C l \right) \right|.$$

Здесь порядок расчета тот же, что и в предыдущем примере.

Для определения n выразим утечку, вносимую ответвлением через утечку электровоза:

$$Y_{отв} = 5 Y_{эл}.$$

Таким образом,

$$n = 20 + 4 \cdot 5 = 40.$$

Километрическую емкость определим по формуле (69):

$$C = 6,7 \cdot 10^{-8} \text{ ф/км}.$$

Индуктивность линий найдем по графику (см. рис. 17):

$$L = 0,7 \cdot 10^{-3} \text{ гн/км}.$$

По кривым на рис. 11 и 12 найдем:

$$Z_л = R + j\omega L \approx 220 e^{j89^\circ}.$$

Распределение активной утечки линии примем равномерным:

$$\nu_a = 0{,}5.$$

В итоге имеем:

$$b_p = \ln \left| 1 + 220 e^{j89^\circ} \cdot 5{,}25 \, (0{,}5 \cdot 40 \cdot 2 \cdot 10^{-3} + j0{,}5 \cdot 21 \cdot 10^{-3} \cdot 5{,}25) \right| =$$

$$= \ln \left| 1 + 79 e^{j143^\circ} \right| = 4{,}30 \text{ неп}$$

С учетом дополнительного затухания

$$b_p = 5{,}3 \text{ неп.}$$

Как видно, результаты расчета по формулам (114) и (123) совпадают достаточно точно.

18. МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ

Достаточно перспективным для исследований и расчета разветвленных силовых сетей является метод электрического моделирования.

Аналитические методы расчета при особо сложных и неоднородных схемах РСС не дают возможности получить все необходимые сведения о физических явлениях, происходящих в данной сети.

Так, например, при нестационарных объектах в контактной сети непрерывно изменяются и входное сопротивление линии и общая картина распределения уровня сигнала.

Значительные трудности при экспериментальных исследованиях возникают из-за имеющегося в линии силового тока высокого напряжения.

Электрическое моделирование в таких случаях дает широкие возможности для изучения самых различных режимов работы в удобных для ведения исследований лабораторных условиях. Практически метод моделирования высокочастотных каналов применяется при проектировании и расчете систем высокочастотной связи по шахтным контактным сетям электровозной откатки.

Модель высокочастотных каналов по шахтной контактной сети состоит из источника переменного тока типа генератора ЗГ-12, индикаторов в виде ламповых вольтметров типа ЛВ-9, набора активных и реактивных сопротивлений, имитирующих сосредоточенные нагрузки линии, и эквивалентных ячеек линии, из которых набирается рассматриваемая схема сети.

Наиболее важными элементами модели являются ячейки линии.

Можно принять, например, П-образную схему замещения (рис. 32) участка линии длиной 25 *м*. Выбор небольшой длины участка линии обусловлен размерами ответвлений и отрезков линии между ответвлениями, а также

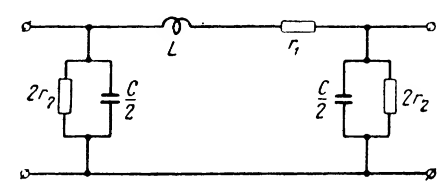


Рис. 32. П-образная схема замещения участка линии.

желанием более точно моделировать процессы в линии РСС.

Установившиеся процессы в цепочечной схеме модели идентичны процессам, происходящим в реальной линии, и соотношения между токами и напряжениями в модели выражаются уравнениями:

$$\left.\begin{aligned}\dot{U}_n &= \dot{U}_н \operatorname{ch}\gamma(n-1) - \dot{I}_н Z_с \operatorname{sh}\gamma(n-1);\\ \dot{I}_n &= \dot{I}_н \operatorname{ch}\gamma(n-1) - \dot{U}_н \frac{1}{Z_с}\operatorname{sh}\gamma(n-1),\end{aligned}\right\} \qquad (125)$$

где $\dot{U}_н$, $\dot{I}_н$ — напряжение и ток в начале линии (модели);
$\dot{U}_n$, $\dot{I}_n$ — напряжение и ток в начале n-ячейки;
n — номер ячейки.

Величина элементов ячейки для принятых размеров модели может быть найдена для всего рассматриваемого диапазона частот 10—150 *кгц* непосредственно по километрическим параметрам $Z_л$ и $Y_л$:

$$\left.\begin{aligned}r_1 + j\omega L &= lZ_л;\\ \frac{1}{r_2} + j\omega C &= lY_л,\end{aligned}\right\} \qquad (126)$$

где r_1 — активное сопротивление ячейки модели;
r_2 — сопротивление утечки ячейки модели;
L — индуктивность ячейки модели;
C — емкость ячейки модели;
l — длина участка линии;
$Z_л$ — полное километрическое сопротивление линии;
$Y_л$ — полная километрическая проводимость линии.

Для более протяженных схем РСС с целью упрощения конструкции модели длина ячейки может быть увеличена до $l = 0{,}2 \div 0{,}5$ *км*. В таком случае расчет элементов модели с необходимой точностью можно произвести по приведенным выражениям, введя коэффициенты Кеннели:

$$\left.\begin{aligned} r_1 + j\omega L &= lZ_л K_2 = lZ_л\left(1 - \frac{\gamma^2 l^2}{12}\right); \\ \frac{1}{r_2} + j\omega C &= lY_л K_1 = lY_л\left(1 + \frac{\gamma^2 l^2}{6}\right), \end{aligned}\right\} \qquad (127)$$

где v — скорость распространения электромагнитной волны по линии.

Конструкция модели упрощается при замене некоторых ответвлений эквивалентными им сосредоточенными сопротивлениями.

Достаточно просто заменяются короткие ответвления $l_{отв} \leqslant \frac{\lambda}{8}$. Учитывая то, что при таких длинах $\operatorname{th} \gamma l_{отв} \approx \gamma l_{отв}$, а также $G \ll \omega C$, имеем:

$$Z_{отв} \approx -j\frac{1}{\omega C l_{отв}},$$

где C — километрическая емкость линии;

$l_{отв}$ — длина ответвления.

Таким образом, короткие ответвления могут быть замещены емкостями соответствующей величины.

Обработанные при помощи ВЗ нагрузки линии замещаются активными сопротивлениями. Длинные ответвления с согласованной нагрузкой замещаются активными сопротивлениями, равными волновому сопротивлению $Z_с$.

Общий вид модели линии показан на рис. 33.

По рекомендации автора экспериментальными электротехническими мастерскими Укрэнергочермета г. Харькова была сконструирована модель высокочастотного канала по шахтной контактной сети, но несколько иной конструкции. Искусственная линия изготовлена так, что можно производить измерение в любой точке линии.

Конструктивно эта электрическая модель выполнена в виде полого керамического цилиндра с намотанной на нем однослойной катушкой, которая отделена от цилиндра слоем конденсаторной бумаги и алюминиевой фольги. Активное сопротивление катушки и потери в диэлектрике искусственной линии имитируют соответственно километрическое активное сопротивление и утечку контактной сети.

Двухцепные участки линии собираются из рассмотренных запараллеленных ячеек искусственной линии. Схема и конструкция модели приведены на рис. 34.

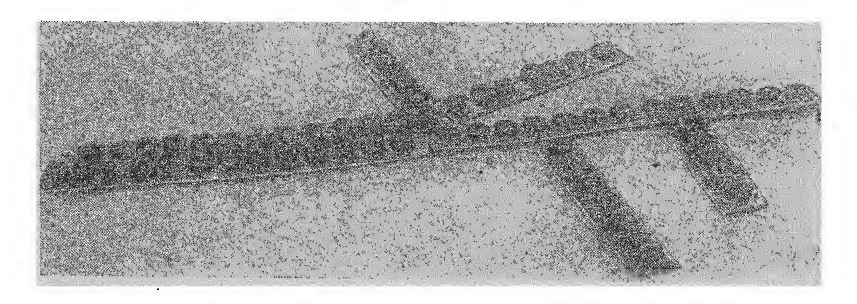


Рис. 33. Общий вид модели линии.

На рассмотренных моделях можно осуществить широкий комплекс исследовательских и расчетных работ:

1) определить распределение уровней передаваемого сигнала вдоль цепи;

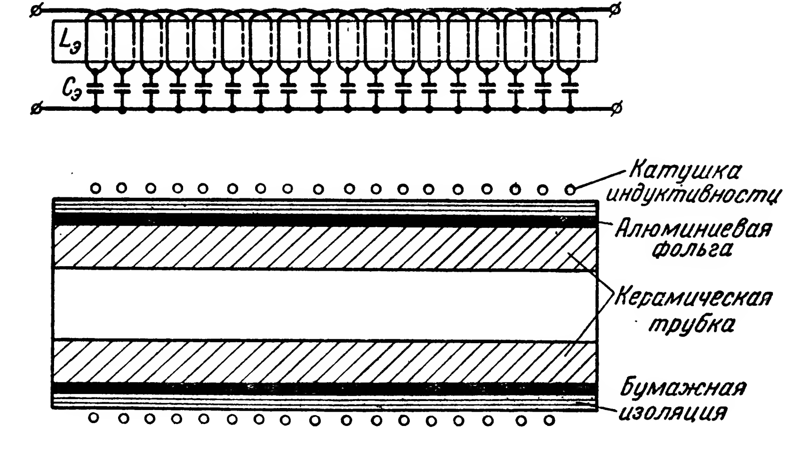


Рис. 34. Схема и конструкция модели с распределенными параметрами.

2) найти зависимость входного сопротивления и затухания линии от ее параметров, длины, количества и места подключения ответвлений, электродвигателей, трансформаторов и пр.;

3) установить наиболее рациональные параметры высокочастотной обработки линии и мест ее подключения.

4) воспроизвести различные режимы работы линии с целью определения оптимального варианта;

5) определить условия устойчивой работы линии при проектировании и в процессе эксплуатации с изменением схемы цепи.

Измерения, проведенные на модели контактной сети, достаточно точно подтверждаются экспериментальными данными.

Разработку моделей РСС переменного тока нужно вести с учетом опыта по изготовлению расчетных столов, предназначенных для решения энергетических задач. При расчете конструкций модели следует учитывать взаимные влияния магнитных полей катушек индуктивности, поэтому необходимо предусматривать их экранировку.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОМЕХИ

19. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Большое влияние на работу высокочастотных каналов оказывают электрические помехи. В распределительных сетях 10/0,2 *кв* помехи имеют высокий уровень и занимают широкий диапазон частот. Эти помехи в сетях 10/0,2 *кв* обусловлены наличием на линии высокого напряжения, коммутационными процессами, работой различных энергетических установок и рядом других факторов.

Наиболее интенсивны в распределительных электрических цепях коммутационные помехи. Они образуются во время различных переключений в высоковольтной сети, вследствие возможных неплотных соединений и т. п.

Возникающие импульсные помехи различны по величине, продолжительности и занимают широкий диапазон частот.

Особенно большой уровень помех возникает в местах неплотных соединений и при каких-либо повреждениях линии (некачественная пайка, скрутка, плохой контакт в разъединителях и т. п.). В таких случаях напряжение помехи может достигать нескольких вольт и даже десятков вольт.

Значительный уровень помех получается при грозовых разрядах, во время дождя, града, инея. Эти помехи обычно называются атмосферными.

Коммутационные и атмосферные помехи в установках связи прослушиваются на телефон в виде беспорядочного шума (воздействие отдельных толчков напряжения, различных по величине и продолжительности).

Сильные импульсные помехи образуются при возникновении дуги во время работы выключателей, сварочных агрегатов, между троллеем и пантографом при движении электровоза и т. п.

Помехи, обусловленные коронированием и разрядами на поверхности изоляторов подвески линии, являются распределенными помехами и также носят хаотический характер. Интенсивность этих помех зависит от величины напряжения в сети и ее состояния. Уровень помех тем выше, чем выше рабочее напряжение сети и хуже состояние изоляторов.

Действие помех на приемные телемеханические устройства зависит от ширины полосы пропускания приемников. Чем шире полоса пропускания, тем больше эффективное напряжение помехи. Как показали исследования, напряжение распределенных помех за фильтром с шириной полосы пропускания Δf определяется следующим образом:

$$U = k\sqrt{\Delta f}. \tag{128}$$

Поэтому всегда нужно указывать, к какой ширине полосы частот относится уровень электрических помех.

Обычно принято уровень электрических помех указывать в полосе частот шириной $\Delta f = 5$ *кгц*. В дальнейшем, когда говорится о напряжениях или уровнях помех, все величины даются для полосы частот 5 *кгц*.

Пересчет эффективного напряжения помех на другую полосу частот для фильтра с любой полосой пропускания Δf [*кгц*] производится по формуле

$$U_{\Delta f} = U_5 \sqrt{\frac{\Delta f}{5}}, \tag{129}$$

а при определении уровня помех

$$p_{\Delta f} = p_5 - \frac{1}{2}\ln\frac{5}{\Delta f}, \tag{130}$$

где U_5, p_5 — соответственно напряжение и уровень помех в полосе 5 *кгц*.

Например, уровень помех в полосе 0,2 *кгц* при $p = -4$ *неп* в полосе 5 *кгц*

$$p_{0,2} = -4 - \frac{1}{2}\ln\frac{5}{0,2} = -4 - \frac{1}{2}\cdot 3,2 = -5,6 \text{ неп.}$$

Для каналов телемеханики большое значение имеют и распределенные и импульсные помехи. В полосе 5 *кгц* на выходе приемника превышение уровня сигнала над уровнем помех должно составлять для каналов телемеханики не менее 2,5 *неп*.

20. ПОМЕХИ В ВОЗДУШНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 10/0,2 *кв*

Электрические помехи в распределительных воздушных сетях занимают широкий диапазон частот и имеют самый разнообразный характер.

Определяющими являются помехи индустриального характера при работе различных электрических установок. В диапазоне частот, начиная с 30 *кгц*, помехи имеют явно

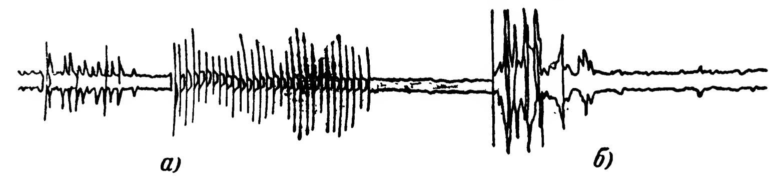


Рис. 35. Осциллограммы электрических помех.
а — при включении мощного электродвигателя; *б* — при работе сварочного агрегата.

выраженный импульсный характер в сетях как низкого, так и высокого напряжения.

Высокий уровень импульсных помех создается при включении мощных электродвигателей. На рис. 35,*а* приведена осциллограмма помех при включении асинхронного двигателя мощностью 500 *квт* в сеть 6 *кв*. При включении этого электродвигателя появляется значительный кратковременный всплеск помех, в 20—50 раз превышающий уровень помех при установившемся режиме. Во время разгона двигателя создается последовательность импульсов с частотой 100 *гц*.

Уровень электрических помех в сети 380 *в* резко возрастает при работе электросварочных агрегатов. Было установлено, что при работе электросварочных агрегатов характер помех тот же, что и при отсутствии сварки, но уровень помех возрастает в 20—30 раз (рис. 35,*б*). Амплиту-

да отдельных выбросов индустриальных помех в этих цепях в диапазоне 30—50 *кгц* достигает долей вольта. Уровень импульсных помех в диапазоне 10—30 *кгц* в некоторых случаях может достигать еще большей величины. С увеличением частоты интенсивность помех снижается.

Для снижения индустриальных помех необходима специальная обработка всех устройств, создающих помехи. Обязательной обработке подлежат электросварочные агрегаты, работающие на постоянном и переменном токе. Вполне приемлемой и простой мерой обработки является установка на входных зажимах агрегата емкостных фильтров. Более эффективно подавляет помехи Г-образный индуктивно-емкостный фильтр с индуктивным входом [Л. 16]. Помимо этого, рекомендуется экранировка источников помех сварочного трансформатора, дросселя и т. п. Блокировочные конденсаторы, шунтирующие агрегат, должны иметь большую емкость, начиная с 1 *мкф* и выше; фильтры устанавливаются непосредственно на корпусе электрической машины при минимальной длине соединительных проводов.

Существенное влияние, особенно в низкочастотной части спектра частот, оказывают помехи, обусловленные гармоническими составляющими напряжения промышленной частоты 50 *гц*. Вполне естественно, что чем выше рабочее напряжение в сети, тем больше и уровень этих помех. Для воздушной сети 6 *кв* при частотах выше 10 *кгц* уровень гармонических составляющих не превышает (—4,0÷—6,0) *неп*.

В табл. 3 приведены уровни общих электрических помех, включая коммутационные помехи, измеренные в линии 6 *кв*, в полосе частот 5 *кгц* (по данным ОРГРЭС).

Таблица 3

Дата измерения,	f, *кгц*	7,5	10	15	20	25
9/II 1957 г.	p_0 [*неп*]	—	—2,95	—3,75	—4,15	—4,65
25/XII 1956 г.	p_0 [*неп*]	—1,85	—2,55	—2,75	—2,75	—2,85

Продолжение табл. 3

Дата измерения	f, *кгц*	30	35	40	45	50	100
9/II 1957 г.	p_0 [*неп*]	—4,55	—4,75	—4,75	—4,65	—4,15	—5,15
25/XII 1956 г.	p_0 [*неп*]	—2,85	—2,95	—2,95	—2,95	—3,0	—3,05

В распределительных сетях, питающихся от общей сети 35 *кв* с тяговыми подстанциями, уровень помех может быть значительно выше вследствие помех, создаваемых ртутными выпрямителями. Эти помехи переходят через трансформатор 35/3 *кв*, питающий ртутные выпрямители, на линию 35 *кв*. Далее помехи распространяются по всей сети 35 *кв* и трансформируются в сеть 6 *кв*, вызывая повышение общего уровня помех во всей распределительной сети.

Как видно из табл. 4, помехи в сети 6 *кв* при работе гяговых подстанций значительно выше указанных в предыдущей таблице.

Таблица 4

f [*кгц*]	11	13	15	17	20	25	30	35	40	50
p [*неп*]	0	—1,0	—1,5	—2,0	—2,6	—2,0	—3,3	—3,7	—3,8	—4,5

Наиболее заметен рост уровня помех на низких частотах. Для борьбы с помехами, вызываемыми тяговыми подстанциями, необходимо устанавливать защитные филь-

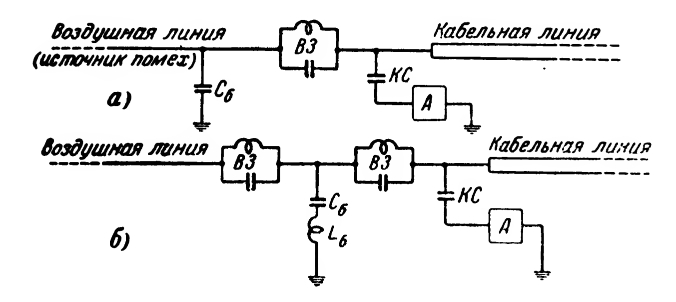


Рис. 36. Схемы помехозащитных фильтров.

тры на самих подстанциях на стороне 3 *кв*, а также на центральной подстанции 35/6 *кв*, питающей распределительную сеть.

Защитный фильтр имеет Г-образную схему (рис. 36,*а*); на рисунке $C_б \geqslant 5$ *мкф* — блокировочная емкость, шунтирующая электрические помехи цепи; *ВЗ* — высокочастот-

ный заградитель, препятствующий утечке токов высокочастотных сигналов через эту шунтирующую цепь. Установка такого защитного фильтра снижает уровень помех в среднем на 2 *неп*.

21. ПОМЕХИ В КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЯХ

Электрические помехи за счет коронирования линии, частичных разрядов по изоляторам, а также атмосферные помехи в кабельных линиях отсутствуют. Основными помехами в кабельных линиях являются коммутационные помехи. Кроме того, значительный уровень помех может быть получен за счет концевых помех, возникающих в электрических устройствах, находящихся за пределами кабельной линии и попадающих в нее через концевые устройства.

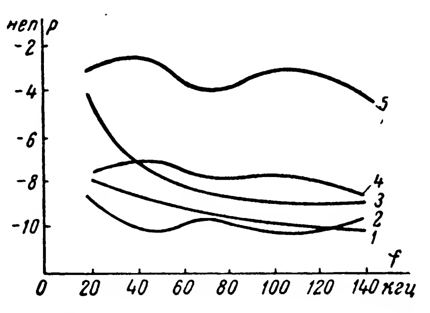


Рис. 37. Уровень электрических помех в кабельных линиях.

1 — шахтная кабельная линия 0,13 *кв*; *2* — кабельная линия 35 *кв*, оканчивающаяся на закрытой подстанции, к которой подходят только кабельные линии; *3* — шахтная кабельная линия 0,38 *кв*; *4* — кабельная линия 35 *кв*, оканчивающаяся на открытой подстанции; *5* — кабельная линия постоянного тока 80 *кв*.

Уровни электрических помех на различных кабельных линиях представлены на рис. 37.

Как видно из рисунка, уровень электрических помех на кабельных линиях лежит преимущественно в пределах от —7 до —10 *неп*. В зависимости от частоты уровень помех изменяется незначительно.

Уровень помех на 2—3 *неп* выше при работе в линии сварочного агрегата или при открытой связи кабельной линии с воздушными ЛЭП.

Интенсивность концевых помех может быть значительно снижена путем установки помехозащитных фильтров на стыке соединения кабельной линии с воздушной линией электропередачи (см. рис. 36,*а* и *б*).

При соответствующей помехозащитной обработке сварочных агрегатов, электрических машин, концов кабельных линий и т. п. средний уровень электрических помех в кабельных распределительных сетях в большинстве случаев не превышает —8 *неп*. Исключение составляют ка-

бельные линии постоянного тока (кривая 5, рис. 37). На этих линиях уровень помех очень высок. Основным источником помех в линиях постоянного тока являются преобразователи тока, выпрямительные и инверторные устройства. Уровень помех в таких линиях может быть значительно снижен при установке на входных цепях преобразовательных устройств помехозащитных фильтров.

22. ПОМЕХИ В КОНТАКТНЫХ СЕТЯХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

Электрические помехи в контактных сетях имеют высокий уровень в широком диапазоне частот и носят очень сложный и разнообразный характер. Наибольшая интенсивность помех наблюдается в низкочастотной части спектра. С увеличением частоты уровень помех снижается. По своему характеру помехи контактной сети делятся на два вида: импульсные и гладкие.

Источником импульсных помех является искрение, возникающее при разрывах электрической цепи во время работы электроустановок (разъединителей, электрических машин и т. п.). Интенсивность помех, образующихся при движении электровозов, в значительной степени зависит от состояния контактного провода и рельсового пути, материала контактного провода и токоприемника, их конструкции, скорости движения электровоза и состояния изоляции линии. Неправильная подвеска контактного провода, наличие на нем неоднородностей, зазубрин, выступов, плохое состояние рельсовых стыков вызывают большое число разрывов контакта и увеличивают интенсивность импульсных помех.

Уровень электрических помех зависит от материала контактного провода и токоприемника. Так, например, известно, что минимальный уровень помех создают токоприемники, имеющие угольные или графитовые накладки. При алюминиевых накладках уровень помех увеличивается в 2 раза, а при стальных накладках — более чем в 3 раза.

Особенно большой уровень помех создается на участке, где вместо медного троллея используется стальной провод. Такие участки есть в шахтных контактных сетях. На поверхности стального провода с течением времени образуются ржавчина и различные неровности. Все это при движении электровозов создает искрение.

Значительное влияние на уровень электрических помех оказывает эластичность подвески контактного провода и

сигнальных проводов (городской и подземный электротранспорт). Чем эластичнее подвешен контактный провод, тем меньше будет искрение при движении электровоза.

Плохой контакт между колесами и рельсами на загрязненном рельсовом пути и при торможении или при буксовке также является источником помех.

Основным источником гладких помех служат преобразователи тока — тяговые подстанции. Они оборудуются ртутными выпрямителями и — реже — двигатель-генераторными преобразователями. Ртутные выпрямители применяются преимущественно металлические шестифазные типа РМНВ.

При работе ртутных выпрямителей появляется большое количество переменных составляющих тока, различных по частоте и амплитуде. Наибольшую амплитуду имеет переменная составляющая с частотой 300 *гц* при работе ртутного выпрямителя по шестифазной схеме ($50 \cdot 6 = 300$ *гц*). Помимо частоты 300 *гц*, образуются и ее гармоники: 600 *гц*, 900 *гц* и т. д., интенсивность которых с увеличением частоты уменьшается.

На некоторых частотах проявляются значительные всплески уровней помех. Это вызвано собственными резонансами в схеме тяговой подстанции. Электрическая схема тяговой подстанции в высокочастотном спектре частот состоит из ряда индуктивностей, емкостей и активных сопротивлений, определяемых силовым трансформатором, дросселем, конструкцией ртутного выпрямителя, соединительных шин, проводов и пр. В совокупности элементы образуют довольно сложную схему, которая и имеет ряд резонансов.

При прослушивании на телефон помеха от тяговой подстанции в широком спектре частот ощущается в виде непрерывного гудения с частотой 300 *гц*. Это объясняется тем, что в сети происходит паразитная модуляция всех высокочастотных помех основной составляющей 300 *гц*.

В тех случаях, когда тяговая подстанция оборудована двигатель-генераторными преобразователями, основная частота помех примерно равна 1 000 *гц*. Для снижения интенсивности помех, создаваемых тяговой подстанцией, производится специальная помехозащитная обработка подстанций.

На железнодорожных тяговых подстанциях применяется схема снижения уровня помех, приведенная на рис. 38. Устройство состоит из реактора $L_р$, резонансных конту-

ров и отдельного конденсатора C_5 [Л. 18]. Каждый из четырех последовательных контуров настроен в резонанс на одну из основных гармоник пульсирующего напряжения: 300, 600, 900 и 1 200 *гц*. Таким образом, контуры замыкают накоротко токи этих гармоник.

Установка конденсатора C_5 (пятый контур) предназначена для снижения интенсивности помех в диапазоне высоких частот. Для хорошей фильтрации необходимо, чтобы конденсатор C_5 имел большую емкость, порядка нескольких десятков микрофарад. Эффективность работы контуров тем выше, чем меньше их активные сопротивления. Поэтому соединительные проводники должны иметь минимальную длину. В противном случае они могут внести для токов высокой частоты значительное затухание, что резко снизит эффективность работы сглаживающего устройства.

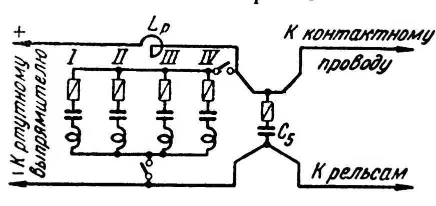


Рис. 38. Схема снижения уровня электрических помех на железнодорожных тяговых подстанциях.

Реактор $L_р$, включенный в плюсовой провод, представляет значительное сопротивление для токов высокой частоты ($L_р \approx 4{,}5 \div 6{,}5$ *мгн*), что также снижает уровень электрических помех.

На тяговых подстанциях подземного электротранспорта применяется схема подавления помех, представленная на рис. 39. Снижение уровня помех осуществляется при помощи емкостной блокировки $C_б$ сборных шин тяговой подстанции и установки конденсаторов $C_ф$ между каждым анодом и общим катодом ртутного выпрямителя. Такая схема обработки ртутных выпрямителей предназначена для снижения помех преимущественно в высокочастотном спектре (>30 *кгц*).

На анодах ртутника устанавливаются конденсаторы типа КБГП емкостью 0,5—1,0 *мкф*. Блокировка сборных шин производится конденсаторами того же типа емкостью $C_б \approx 10$ *мкф*. Учитывая возможность возникновения в цепи ртутного выпрямителя перенапряжений, превышающих в 3—4 раза рабочее напряжение между анодами ртутного выпрямителя и катодом, соответственно должно быть рассчитано рабочее напряжение устанавливаемых конденсаторов.

Установка конденсаторов $C_ф$ на анодах ртутников сдвигает собственные резонансы тяговой подстанции в область более низких частот, за пределы рабочего диапазона частот, что в значительной степени снижает интенсивность помех. Действие блокировочной емкости $C_б$, как и в схеме фильтра железнодорожных тяговых подстанций, заклю-

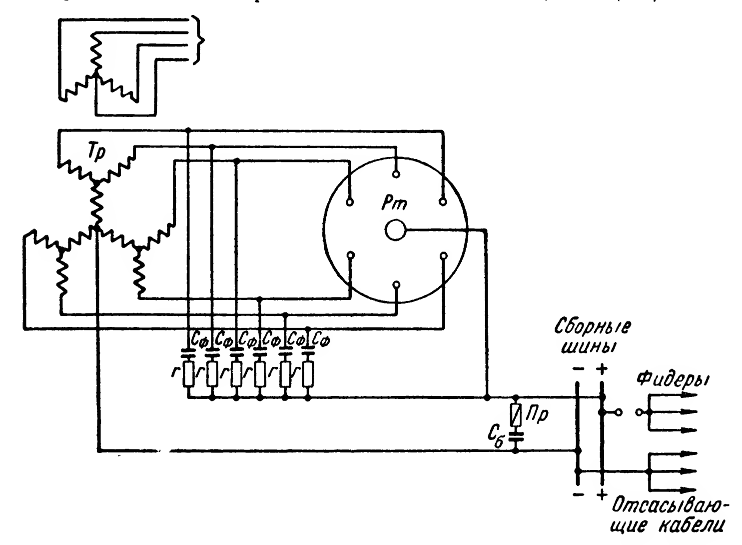


Рис. 39. Схема снижения уровня электрических помех на подземных тяговых подстанциях.

чается в шунтировании помех на сборных шинах тяговой подстанции.

Активные сопротивления $r \approx 50 \div 100$ *ом*, включенные последовательно с конденсаторами $C_ф$, способствуют сглаживанию частотной характеристики помех тяговой подстанции, а также обеспечивают более надежную работу.

Помехозащитный фильтр устанавливается непосредственно на корпусе ртутника для сокращения длины соединительных проводников. Установка такого фильтра сокращает интенсивность помех тяговой подстанции на 2—4 *неп*.

Наиболее просто и экономично уровень электрических помех, создаваемых тяговой подстанцией, снижается при установке только блокировочных конденсаторов $C_б$ емкостью около 10 *мкф*, присоединяемых параллельно каждому ртутному агрегату.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

АППАРАТУРА КАНАЛОВ ТЕЛЕМЕХАНИКИ ПО РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫМ СИЛОВЫМ ЦЕПЯМ

23. НЕКОТОРЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАЗРАБОТКЕ АППАРАТУРЫ

В результате анализа различных типов РСС можно сделать ряд выводов и заключений по организации телемеханических каналов и разработке аппаратуры. При этом одним из наиболее важных вопросов, которые приходится решать, является выбор рабочего диапазона частот.

В распределительных сетях малой протяженности, общая длина которых не превышает 10 *км*, километрическое затухание невелико. Исключение составляют кабельные линии с резиновой изоляцией и линии со стальными проводами. Несмотря на малую протяженность таких линий, их рабочее затухание может быть очень большим и за счет влияния неоднородностей линии — ответвлений, трансформаторов, электродвигателей и пр. Затухание растет с увеличением частоты.

Наиболее приемлемым диапазоном частот для РСС следует считать 10—100 *кгц*. Более низкие частоты отмеченного диапазона частот следует выбирать в линиях с кабельными вставками, линиях со стальными проводами, а также в линиях, имеющих большое количество неоднородностей.

При необходимости организации большого числа каналов возможно применение более высоких частот — до 150 *кгц* для близлежащих объектов. Каналы высокочастотной телефонной связи целесообразно располагать в верхней части отмеченного спектра в пределах 50—100 *кгц*, а нижние частоты предоставить для телемеханических каналов.

Частоты ниже 10 *кгц* использовать затруднительно вследствие сильного роста уровня электрических помех. По этим причинам нижний предел рабочего спектра частот для каналов по контактным сетям электровозной откатки следует принять не ниже 20—30 *кгц*, так как на таких линиях уровень помех ниже 20 *кгц* резко возрастает.

Другой важной задачей при разработке системы ТУ—ТС по распределительным силовым сетям является выбор системы селекции.

Опыт внедрения аппаратуры высокочастотной связи и телемеханики по сельским и шахтным распределительным

силовым сетям и контактным сетям городского электротранспорта показал, что наиболее приемлемы частотные системы кодообразования. Выбор частотных систем селекции определяется прежде всего их большей помехоустойчивостью. Система селекции при этом может быть одноступенчатой и двухступенчатой.

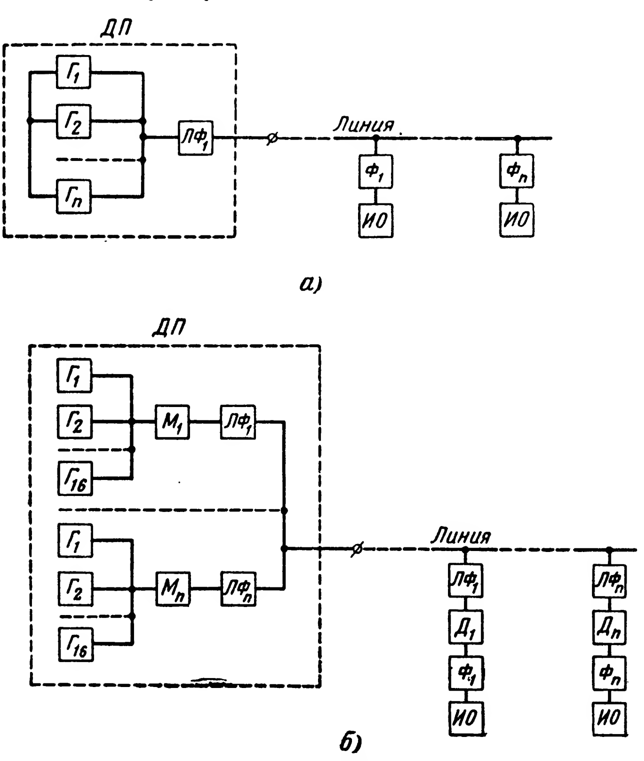


Рис. 40. Блок-схема аппаратуры частотных систем телемеханики.

а — при одноступенчатой системе; *б* — при двухступенчатой системе. *ДП* — диспетчерский пункт; *ИО* — исполнительный объект; *Г* — генератор тональной частоты; *ЛФ* — линейный (групповой) фильтр; *Ф* — фильтр телемеханического канала связи; *М* — модулятор; *Д* — демодулятор.

При одноступенчатой системе селекции передача сигналов ТУ—ТС по линии осуществляется немодулированными сигналами, т. е. токами отдельных частот или их комбинациями. Такая система проста в исполнении. Она состоит в основном из генераторов на передающем конце и фильтров на приемном конце (рис. 40,*а*). Главный не-

достаток такой системы — ее малая емкость. В рабочем диапазоне частот 10—100 *кгц* организуют всего несколько десятков телемеханических каналов. Число каналов может быть увеличено, так как для нормальной работы телемеханического канала из-за нестабильности генераторов сигналов требуется полоса порядка 10 *гц*, но тогда возрастают трудности расфильтровки. Фильтры приемных устройств становятся сложными и громоздкими.

Для системы ТУ—ТС большой емкости целесообразно применение двухступенчатой частотной системы (рис. 40,*б*). В этом случае объектам присваиваются частоты, расположенные в тональном спектре, а передача сигналов по линии осуществляется при помощи токов высоких частот (несущих), промодулированных звуковыми частотами (поднесущими). В тональном спектре при несложной фильтрующей системе размещается 15—20 каналов. В качестве типовой может быть, например, принята система тонального телеграфа, имеющая 16 каналов при ширине полосы частот каждого канала 140 *гц*. Емкость системы значительно увеличивается, если объектам присвоить комбинации частот. При комбинации 16 частот по 2 число каналов увеличивается до 120, по 3 — до 560 и т. д.

Если учесть, что по линии можно передавать сигналы с несколькими несущими частотами, то число каналов еще увеличивается:

$$N = kC_m^n, \tag{131}$$

где k — число несущих частот;

C_m^n — число сочетаний из m по n;

m — количество тональных частот;

n — число комбинаций тональных частот.

Практически n не превышает 2—3.

В некоторых случаях при необходимости дальнейшего увеличения числа каналов возможно разделение РСС при помощи заградителей на несколько обособленных частей с многократным использованием несущих и тональных частот.

Учитывая потребности различных предприятий, телемеханическая аппаратура должна быть разработана по меньшей мере в двух вариантах: малой емкости — на несколько десятков сигналов ТУ—ТС и большой емкости — на несколько сотен сигналов ТУ—ТС.

Аппаратура малой емкости, предназначенная для ра-

боты по распределительным силовым сетям, должна найти широкое применение в сельском хозяйстве, нефте- и газопромыслах и т. п. Аппаратура большой емкости необходима для крупных промышленных объектов, в шахтах, металлургических комбинатах, оросительных системах и т. п.

Весьма перспективна совмещенная аппаратура, обеспечивающая одновременно высокочастотную телефонную связь и ТУ—ТС небольшой емкости.

Приемо-передающая аппаратура должна перекрывать затухание до 5—7 *неп*, мощность передатчика распорядительного поста порядка 10—20 *вт* и исполнительного объекта около 3—5 *вт*. Мощность первого выше вследствие возможности его работы на несколько направлений.

Наименьший уровень приема на воздушных РСС 10/0,2 *кв* переменного тока составляет приблизительно —2,5 *неп*, постоянного тока (контактные сети) — около —1,0 *неп*. На кабельных линиях уровень приема может быть несколько ниже: до —3,0 *неп*. Так как уровень электрических помех в распределительных силовых сетях высок, целесообразно применение частотной модуляции.

24. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРИМЕНЯЮЩЕЙСЯ НА РСС АППАРАТУРЕ ТЕЛЕМЕХАНИЧЕСКИХ КАНАЛОВ

К настоящему времени распределительные силовые сети используются преимущественно для целей высокочастотной телефонной связи.

На сельских РСС 35/6 *кв* применяются посты типа МВП-52м. Аппаратура имеет амплитудную модуляцию с передачей тока несущей и обеих боковых полос, несущие частоты 30—300 *кгц*, с разносом каналов на 20% высшей частоты, но не менее 15 *кгц*. Система обеспечивает максимальное перекрываемое затухание около 6 *неп*; чувствительность приемника составляет —1,5 *неп*. Высокочастотный выход поста рассчитан на работу с нагрузкой 100, 200, 400 или 600 *ом*.

Для организации связи с подвижными торфоуборочными машинами по РСС 6/0,5 *кв* ОРГРЭС разработал специальную малогабаритную аппаратуру. Эта аппаратура рассчитана на работу в условиях повышенной механической тряски, запыленности и влажности воздуха. В качестве несущих приняты частоты 17 и 34 *кгц*. Отличительной особенностью этой аппаратуры является отсутствие задающего генератора в передатчиках абонентских постов

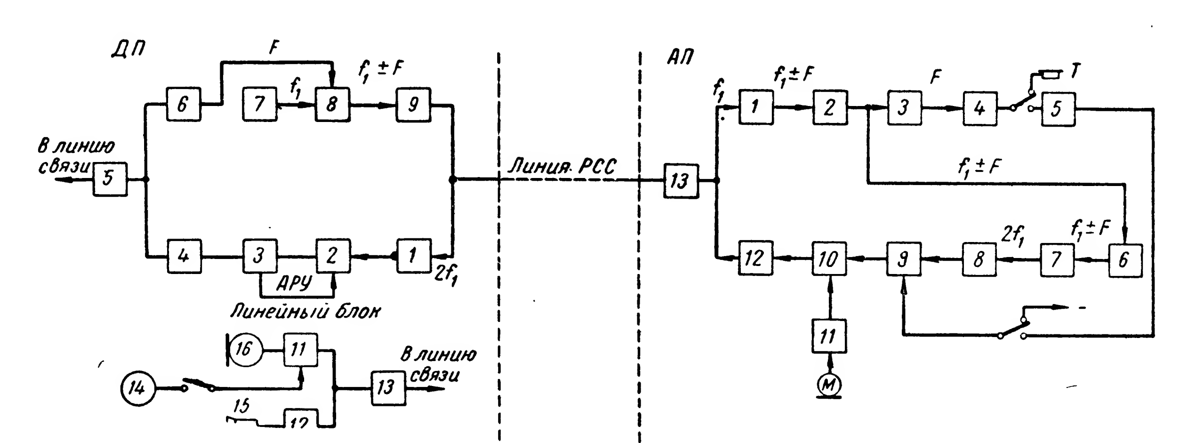


Рис. 41. Блок-схема аппаратуры высокочастотной связи на торфоразработках.

АП — абонентский пункт; *1* — приемный фильтр; *2* — высокочастотный усилитель; *3* — детектор; *4* — низкочастотный усилитель; *5* — фильтр вызывной частоты; *6* — входной каскад; *7* — амплитудный ограничитель; *8* — удвоитель частоты; *9* — промежуточный каскад; *10* — модулятор; *11* — низкочастотный усилитель; *12* — усилитель передачи; *13* — защитный фильтр; *Т* — телефон; *М* — микрофон; *ДП* — диспетчерский пункт; *1* — фильтр приема; *2* — высокочастотный усилитель; *3* — детектор; *4* — низкочастотный усилитель приема; *5* — дифференциальная система; *6* — низкочастотный усилитель передачи; *7* — фазоинверсный каскад; *8* — высокочастотный усилитель и модулятор; *9* — фильтр передачи; *11* — генератор — усилитель передачи; *12* — усилитель приема: *13* — дифференциальная система; *14* — генератор вызова; *15* — громкоговоритель; *16* — микрофон.

[Л. 10]. В качестве несущей частоты абонентских постов используется удвоенная частота приемника. Блок-схема диспетчерского *ДП* и абонентского *АП* постов показана на рис. 41. Высокочастотный выход абонентского поста рассчитан на нагрузку 50 *ом*, так как электропривод торфоуборочных машин питается по кабельному фидеру. Уровень передачи составляет +3 *неп*, минимальный уровень приема — 2 *неп*.

Еще в более тяжелых условиях работает аппаратура высокочастотной связи на подземном контактном транспорте. Эта система связи предназначена для работы по контактной сети шахты (260 *в* постоянного тока) на частотах 30—120 *кгц*. Абонентские посты устанавливаются на электровозах. С целью сокращения габаритов и повышения надежности работы в 1960 г. разработана аппаратура полностью на полупроводниковых элементах с автономным питанием от аккумуляторов. Внешний вид абонентского поста показан на рис. 42. Аппаратура обеспечивает дуплексную (двустороннюю) телефонную связь диспетчера с машинистами электровозов с возможностью организации связи с абонентами городской телефонной сети. Для повышения помехоустойчивости системы используется частотная модуляция. Применение двухчастотного вызывного кода, получающегося в результате комбинации 11 вызывных тональных частот, обеспечило емкость селекторного устройства до 100. Большая емкость селектора (для целей связи необходимо 10—20 направлений) позволяет при необходимости использовать аппаратуру и для целей ТУ—ТС.

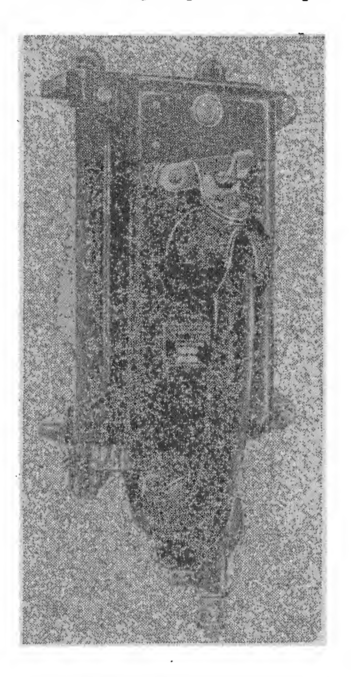


Рис. 42. Общий вид абонентского поста подземной высокочастотной связи.

На городском электротранспорте внедряется комплексная аппаратура высокочастотной связи и телесигнализации «Сибирь-60». В аппаратуре, кроме телефонной связи с водителями движущихся трамваев, предусмотрен при необ-

ходимости переход во второй рабочий режим — режим «телесигнализации». При этом у диспетчера на световом табло получается информация о движении поездов с контрольных точек контактной сети и одновременно регистрация времени прохождения каждого поезда на ленте счетчика.

Контрольные пункты оборудуются приемниками и петлевыми датчиками электромагнитного поля промышленной частоты. Петлевые датчики закладываются на пути

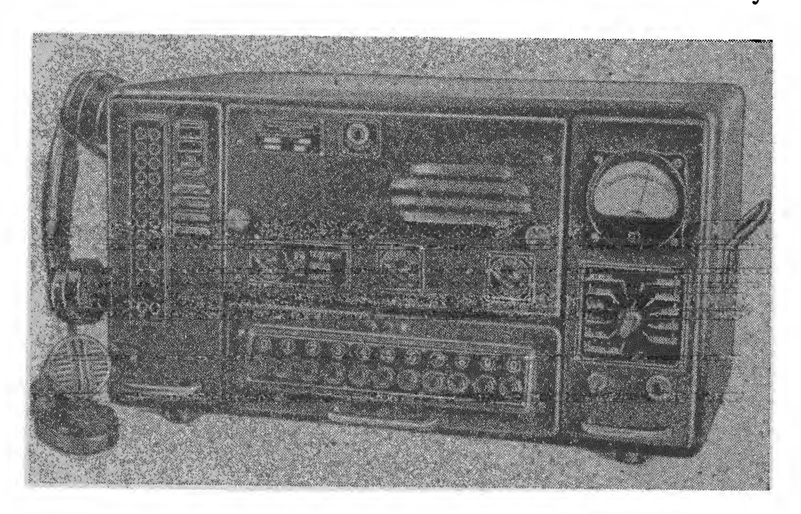


Рис. 43. Общий вид диспетчерского поста телесигнализации и связи на городском электротранспорте.

движения поезда (между рельсами или в полотне дороги). Для включения контрольных пунктов диспетчер использует тот же селектор, с помощью которого посылается вызов абонентским станциям. Одновременно диспетчер может контролировать движение поездов только через один контрольный пункт.

Комплект аппаратуры состоит из одного диспетчерского поста (рис. 43), поездных постов (до 110 единиц), конструкция которых аналогична конструкции электровозных шахтных аппаратов, и постов контрольных пунктов (до 100 единиц). Мощности передатчиков: диспетчерского поста — 10—15 *вт*, поездного поста — 4—6 *вт*. Чувствительности приемников: диспетчерского поста — 40 *мв*, поездного поста — 20 *мв* и поста на контрольном пункте — 40 *мв*.

Принята частотная система модуляции. Эта аппаратура может быть использована также на шахтных и карьерных электропоездах, цеховых и портовых электрокранах и т. п.

На сельских распределительных силовых сетях 35/0,5 *кв* применяется и аппаратура, предназначенная для работы по линиям электропередачи, например устройства типа ВРТ-53, предназначенные для ТУ—ТС выключателей мощности, разъединителей, реле, электрических и механических приборов контроля положения и различной аппаратуры, имеющей электропривод. Аппаратура ВРТ состоит из двух полукомплектов—диспетчерского и исполнительного— и предназначена для работы только между двумя пунктами. Имеется несколько различных моделей устройства ВРТ-53, например модель В-II рассчитана на телеуправление 34, телесигнализацию 47, телеизмерение 11 и регулирование 9 объектов.

Пост типа ТДО-52 рассчитан для передачи сигналов ТУ—ТС в двух независимых направлениях с частотой импульсов 15—50 *гц* и сигналов телеизмерения частотно-импульсной и частотной систем. Аппаратура может обеспечить наибольшее перекрываемое затухание 5—7 *неп*, несущие частоты располагаются в диапазоне 30—300 *кгц*.

Аппаратура ТДО—ЧМ предусмотрена для передачи сигналов телемеханики и связи. Телемеханические сигналы передаются с частотной модуляцией; в телефонном канале применена амплитудная модуляция.

Многоканальный пост типа ТМД/П6 предназначен для передачи в одном направлении до шести телеизмерительных сигналов (ТИ). Используется диапазон частот 40—300 *кгц* с передачей по линии только одной боковой полосы (без передачи несущей частоты). Каналы ТИ образуются шестью тональными частотами. Максимально допустимое затухание канала в зависимости от типа линии 4,5—6,5 *неп*.

Аппаратура ТМТ-6М рассчитана на передачу шести звуковых частот с возможностью их комбинаций. Выбор частот осуществляется по типу тонального телеграфа ТТ-12/16 через 180 *гц* из расчета ширины полосы канала 140 *гц*. Сигналы передаются путем частотной модуляции звуковых частот.

Выбор аппаратуры ТУ—ТС и каналов связи определяется необходимостью обеспечения максимальной надежности работы телемеханической системы, наименьших капи-

тальных затрат и эксплуатационных расходов и возможно меньших переделок принятой аппаратуры. Выбор типа и количества высокочастотных постов зависит от количества исполнительных пунктов, необходимых для включения в систему ТУ—ТС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов К. К., Ильин А. А., Исследование первичных параметров контактной сети шахты, Известия СО АН СССР, 1959, № 9.

2. Акульшин П. К., Распространение электромагнитной энергии по проводам, Связьиздат, 1937.

3. Белоус Б. П., Высокочастотная связь по линиям электропередачи, Госэнергоиздат, 1952.

4. Быховский Я. Л., Телемеханика и ее применение, Трудрезервиздат, 1956.

5. Быховский Я. Л., Инструкция по измерениям и расчету высокочастотных параметров линий электропередачи, Госэнергоиздат, 1953.

6. Быховский Я. Л., Высокочастотная связь по линиям электропередачи, Госэнергоиздат, 1943.

7. Быховский Я. Л., Микуцкий Г. В., Соколов В. Б., Расчет высокочастотных каналов по линиям электропередачи, Госэнергоиздат, 1957.

8. Веников В. А., Иванов-Смоленский А. В., Физическое моделирование электрических систем, Госэнергоиздат, 1956.

9. Герценштейн Б. Я., Савина Н. А., Основы теории и расчета линий проводного вещания, Связьиздат, 1956.

10. Ефремов В. Е., Каналы связи и телемеханики по трехфазным распределительным электрическим сетям 3—6—10/0,5—0,4 *кв*, Наладочные и экспериментальные работы ОРГРЭС, вып. XIX, Госэнергоиздат, 1959.

11. Ильин А. А., Приближенный анализ контактной сети шахты как линии высокочастотной связи, Труды ИГД СО АН СССР, вып. 1, Углетехиздат, 1958.

12. Ильин А. А., Расчет затухания высокочастотных каналов по контактной сети шахты, Известия СО АН СССР, 1959, № 7.

13. Ильин А. А., Пелипенко В. Н., Савкин М. М., Шахтная высокочастотная связь системы «Сибирь-УЭЧМ», ЦИТИ, Госгортехиздат, 1960.

14. Каминский Е. А., Быховский Я. Л., Проектирование схем автотелеуправления тяговыми подстанциями, Трансжелдориздат, 1959.

15. Каллер М. Я., Теория электрических цепей, Трансжелдориздат, 1956.

16. Лютов С. А., Индустриальные помехи радиоприему и борьба с ними, Госэнергоиздат, 1952.

17. Мановцев А. П., Раввин Г. И., Основы телеуправления и телеконтроля, Госэнергоиздат, 1959.

18. Михайлов М. И., Влияние внешних электромагнитных полей на цепи проводной связи и защитные мероприятия, Связьиздат, 1959.

19. Микуцкий Г. В., Высокочастотные каналы релейной защиты, Госэнергоиздат, 1959.

20. Огороднейчук И. Ф., Дистанционное управление шахтными механизмами при помощи токов высокой частоты, Материалы научно-технической конференции, Углетехиздат, 1956.

21. Пенкин Н. Ф., Телемеханические каналы связи диспетчерской централизации, Труды ВНИИЖТ, вып. 182, Трансжелдориздат, 1959.

22. Подольский В. А., Об устойчивости работы схемы потенциального заграждения, «Вопросы рудничного транспорта», 1959, № 3.

23. Савкин М. М., Ильин А. А., Снижение электрических помех, создаваемых ртутными тяговыми подстанциями, ЦИТИ, «Горные машины», 1959, № 9.

24. Сидельников В. В., Высокочастотная связь по кабельным линиям высокого напряжения, НТОЭП, Вопросы автоматики и телемеханики, 1959.

25. Смирнов Б. В., Служебная связь по сельским высоковольтным сетям, Сельхозгиз, 1957.

26. Смирнов Б. В., Расчет затухания токов высокой частоты в неразветвленных линиях 6—35 *кв* «Электричество», 1957, № 1.

27. Смирнов Б. В., О расчете затухания электромагнитной энергии высокой частоты в разветвленных трехфазных сельских сетях, Научные труды ВИЭСХ, т. 1, Сельхозгиз, 1954.

28. Черненко М. Б., Применение радиосвязи в подземных условиях, «Горный журнал», 1956, № 5.

Цена 30 коп.